



TUGAS AKHIR – MO141326

**ANALISIS KEANDALAN PADA *OFFSHORE PIPELINE* AKIBAT
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) DI PERAIRAN MADURA**

NADIRA IFTI RAISYA

NRP. 04311540000040

Dosen Pembimbing:

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, M.RINA., Ph.D

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Tekonologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2019



FINAL PROJECT – MO141326

**RELIABILITY ANALYSIS ON OFFSHORE PIPELINE DUE TO
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) AT MADURA SEAS**

NADIRA IFTI RAISYA

NRP. 04311540000040

Supervisors:

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, M.RINA., Ph.D

Department of Ocean Engineering

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

2019

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS KEANDALAN PADA OFFSHORE PIPELINE
AKIBAT VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) DI
PERAIRAN MADURA
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi
Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

NADIRA IFTI RAISYA

NRP. 04311540000040

Disetujui Oleh:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc

(Pembimbing 1)

2. Prof. Ir. Daniel M. Rosyidi, M.RINA., Ph.D

(Pembimbing 2)



3. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

(Penguji 1)

4. Dr. Ir. Handayanu, M.Sc.

(Penguji 2)

Handayanu

ANALISIS KEANDALAN PADA OFFSHORE PIPELINE AKIBAT VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) DI PERAIRAN MADURA

Nama Mahasiswa : Nadira Ifti Raisya

NRP : 04311540000040

Departemen : Teknik Kelautan

Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani M.Sc.

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid Ph.D., M.RINA

ABSTRAK

Eksplorasi minyak dan gas lepas pantai membutuhkan pipa bawah laut sebagai salah satu alat transportasi minyak dan gas. Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada pipa bawah laut adalah free span. *Free span* di akibatkan oleh kontur permukaan dasar laut yang tidak teratur dan menyebabkan pipa terbentang bebas di antara dua tumpuan (*support*). Sehingga, analisa panjang allowable free span dan analisa VIV (*Vortex Induced Vibration*) yang menyebabkan osilasi pada pipa merupakan aspek yang penting dalam perancangan *offshore pipeline*. Analisis *free span* dilakukan memacu pada kode standar DNV RP F105 (Free Spanning Pipelines). Setiap span memiliki panjang span kritis, terdapat 4 titik span yang mengalami kondisi kritis atau melebihi allowable span length pada kondisi inline yaitu span 33.9 m dengan panjang kritis 31.6 m, span 34.8 m dengan panjang kritis 31.2 m, span 42.9 m dengan panjang kritis 25.4 m, dan span 49.9 m dengan panjang kritis 21.9 m. VIV akan menyebabkan terjadinya tegangan dinamis pada pipa, tegangan paling besar terjadi pada span 49.9 m dengan arah *crossflow* $9,59 \times 10^7$ Pa dan arah inline $2,61 \times 10^8$ Pa. Sedangkan, tegangan dinamis yang terjadi paling kecil dengan kondisi crossflow pada span 14,73 m $1,03 \times 10^7$ Pa dan untuk arah inline pada span 11,06 m yaitu $1,16 \times 10^7$ Pa. Kemudian dilakukan simulasi vortex menggunakan ANSYS Fluent. Untuk mengetahui apakah pipa andal terhadap VIV digunakan simulasi Monte Carlo dengan moda kegagalan persamaan screening kriteria VIV, dan dihasilkan 5 titik span terpanjang 31.8 m, 33.9 m, 34.8 m, 42.9 m, 49.9 m memiliki peluang keandalan 0.001 dan tidak andal terhadap VIV.

Kata kunci: Free Span, VIV, Monte Carlo, Keandalan, ANSYS Fluent

RELIABILITY ANALYSIS ON OFFSHORE PIPELINE DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) AT MADURA SEAS

Name : Nadira Ifti Raisya
NRP : 04311540000040
Department : Teknik Kelautan
Supervisor : Ir. Imam Rochani M.Sc.
Prof. Ir. Daniel M. Rosyid Ph.D., M.RINA

ABSTRACT

Oil and gas exploration on offshore generally uses subsea pipelines as one of the oil and gas transportation method. The problems that often occurs in subsea pipelines is free span. Free span is caused by irregular contours of the seabed and causes the pipe to hang up between two supports. Thus, the analysis of allowable free span length and VIV (Vortex Induced Vibration) analysis that causes oscillations in the pipeline is an important aspect in the design of the offshore pipeline. This study based on the standard code DNV RP F105 (Free Spanning Pipelines). Each span has an allowable span length, there are 4 span points that experience a critical condition or exceed the allowable span length in an inline condition which is span 33.9 m with a critical length 31.6 m, span 34.8 m with a critical length 31.2 m, span 42.9 m with a critical length 25.4 m, and span 49.9 m with a critical length 21.9 m. VIV will cause a dynamic stress on the pipe, the biggest stress occurs at span 49.9 m on crossflow direction $9,59 \times 10^7$ and inline direction $8,89 \times 10^8$ Pa. Whereas, the smallest dynamic stress occurs at span 14,73 m crossflow direction $1,03 \times 10^7$ Pa and inline direction occurs at span 11,06 m $1,16 \times 10^7$ Pa. To find out whether reliable pipes against VIV, Monte Carlo simulations are used by using VIV criteria screening equation as the failure modes, and has an outcome that the 5 longest span 31.8 m, 33.9 m, 34.8 m, 42.9 m, 49.9 m having probability of reliability 0.001 and means by that the critical pipelines not reliable against VIV.

Key words: Free Span, VIV, Vortex, Monte Carlo, Reliability, ANSYS Fluent.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Kami panjatkan puji syukur kami ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan hidayahnya dan memberi penulis kesempatan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Tugas Akhir ini berjudul “Analisis Keandalan pada Offshore Pipeline Akibat Vortex Induced Vibration (VIV) di Perairan Madura”.

Tugas akhir ini disusun agar memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Tugas Akhir ini membahas mengenai analisis keandalan akibat VIV.

Susunan Tugas Akhir ini sudah dibuat dengan sebaik-baiknya, namun tentu masih banyak kekurangannya. Oleh karena itu jika ada kritik atau saran apapun yang sifatnya membangun bagi penulis, dengan senang hati akan penulis terima.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Surabaya, 22 Januari 2019

Nadira Ifti Raisya

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusun mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dan menyemangati saya selama pengerjaan Tugas Akhir yaitu:

1. Allah SWT yang telah memberikan pertolongan rahmat dan ridha-Nya dalam pengerjaan Tugas Akhir Penulis;
2. Mami, Papi dan Kakak tercinta Saya yang merupakan motivator terbesar dalam kehidupan Penulis yang selalu memberi dukungan, doa dan kasih sayang kepada Penulis hingga Tugas Akhir ini selesai.
3. Ir. Imam Rochani, M.Sc dan Prof.Ir. Daniel M. Rosyid, M.RINA., Ph.D selaku Pembimbing 1 dan 2 Saya, yang selalu bersedia meluangkan waktu untuk memberikan pendapat dan saran. Terima kasih atas bimbingan dan pembelajaran selama Tugas Akhir ini.
4. Dr.Eng. Rudi Walujo Pratianto, S.T, M.T selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan FTK ITS;
5. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.sebagai dosen wali Penulis selama 4 tahun.
6. Cindy, Farid dan Bianca selaku sahabat Penulis yang selalu setia menemani Penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini, menemani saat suka dan duka dalam berbagai masalah. Membuat masa perkuliahan Penulis penuh warna dan cerita.
7. Rama, Abiyyu, Dowglas, Jordy dan Fadhil selaku sahabat Penulis yang selalu memberi support saat Penulis mengalami kelelahan dalam pengerjaan Tugas Akhir.
8. Mora, Violisa, Salsa, Marsya, Sharas, Ghina, dan Intan selaku sahabat Penulis selama menjalani perkuliahan sampai Tugas Akhir ini, membantu jika ada kesulitan dan selalu ada saat saling membutuhkan.
9. Marginal yang selalu memberikan dukungan selama masa perkuliahan ini, memberi informasi dan ilmu dari berbagai sudut pandang.
10. Teman-teman kosan Panda Wisper yang telah menemani Penulis selama 4 tahun, membuat kosan terasa seperti rumah.
11. Teman-teman bimbingan Tugas Akhir Pipeline yang selalu saling memberi support dan membagi ilmu, informasi dan pengalaman selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

12. Keluarga Tritonous (Angkatan 2015) yang selalu memberi dukungan, membantu dan memberi semangat selama masa perkuliahan.
13. Senior dan Junior Teknik Kelautan yang telah mmeberikan dukungan dan ilmunya selama masa perkuliahan Penulis.
14. Semua pihak terkait yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas pengalamannya sehingga masa perkuliahan penulis penuh cerita.

Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat dikembangkan menjadi lebih baik lagi. Dan penulis memohon kepada Allah SWT untuk membalas semua kebaikan mereka yang telah membantu Penulis selama menjalankan rangkaian proses perkuliahan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.

Surabaya, 22 Januari 2019

Nadira Ifti Raisya

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR NOTASI.....	x
BAB I.....	12
PENDAHULUAN.....	12
1.1 Latar Belakang	12
1.2 Rumusan Masalah.....	14
1.3 Tujuan Penelitian	14
1.4 Batasan Masalah	14
1.5 Manfaat Penelitian	15
1.6 Sistem Penulisan.....	15
BAB 2.....	17
LANDASAN TEORI.....	17
2.1 Tinjauan Pustaka	17
2.2 Dasar Teori	18
2.2.1 Pipa Bawah Laut	18
2.2.2 <i>Free Span</i>	18
2.2.2 DNV RP F-105.....	18
2.2.3 Kondisi Pembebanan	19
2.2.3.1 Instalasi	19
2.2.3.2 Terisi Air	19
2.2.3.3 Hydrotest.....	19
2.2.3.4 Operasi.....	19
2.2.4 Jenis - Jenis Pembebanan	19

2.2.4.1 <i>Functional Load</i>	20
2.2.4.2 <i>Environmental Load</i>	20
2.2.5 Beban Gelombang	21
2.2.5.1 Teori Gelombang	21
2.2.5.2 Spektra Gelombang JONSWAP	21
2.2.5.3 Transformasi Spektra Gelombang.....	22
2.2.5.4 Kecepatan Arus.....	23
2.2.6 Perhitungan Umum Pipa	25
2.2.6.1 Analisa Dimensi Pipa	25
2.2.6.2 Massa Efektif.....	26
2.2.7 Berat Pipa Terendam	26
2.2.8 Beban Hidrodinamis	27
2.2.8.1 Gaya <i>Drag</i>	27
2.2.8.2 Gaya <i>Lift</i>	28
2.2.9 <i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	29
2.2.9.1 Osilasi <i>In-Flow</i>	29
2.2.9.2 Osilasi <i>Cross Flow</i>	30
2.2.10 Parameter VIV (<i>Vortex Induced Vibration</i>).....	30
2.2.10.1 Stability Parameter (Ks)	31
2.2.10.2 Keulegan Carpenter.....	31
2.2.10.3 Reynolds Number	32
2.2.10.4 Reduced Velocity	33
2.2.11 Panjang Span Efektif	35
2.2.12 Frekuensi Natural	36
2.2.13 Vortex Shedding Frequency	38
2.2.14 Tegangan Dinamis	39
2.2.15 Kriteria Screening.....	40
2.2.16 Simulasi Menggunakan ANSYS Fluent	42
2.2.17 Allowable Span Length (Panjang Span Maksimum).....	42
2.2.18 Analisa Keandalan dalam Perancangan.....	43
2.2.19 Jenis-Jenis Metode Analisa Keandalan	44
2.2.19.1 Metode Analisa Keandalan Level – 1	44

2.2.19.2 Metode Analisa Keandalan Level – 2.....	44
2.2.20 Keandalan pada Sistem Rekayasa	45
2.2.21 Simulasi Monte Carlo	46
2.2.21 Moda Kegagalan.....	49
2.2.22 Mitigasi.....	49
BAB 3.....	51
METODOLOGI PENELITIAN	51
3.1 Metode Penelitian.....	51
Metode penelitian dari pengerjaan Tugas Akhir ini disajikan dalam diagram alir di bawah ini:	51
3.2 Prosedur Penelitian.....	53
BAB 4.....	55
ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	55
4.1 Analisa Data.....	55
4.1.1 Data Pipa	56
4.1.2 Data Lingkungan	56
4.1.3 Data Survey Free Span.....	57
4.2 Pembahasan	58
4.2.1 Perhitungan Dimensi Pipa.....	58
4.2.2 Perhitungan Berat Terendam Pipa	58
4.2.3 Perhitungan Massa Efektif	59
4.2.4 <i>Screening Response Model</i>	60
4.2.5 Perhitungan Gelombang JONSWAP	62
4.2.5.1 Iterasi Spektrum (<i>Transfer Function G</i>)	63
4.2.5.2 Suu (Spektrum Kecepatan Partikel)	63
4.2.5.3 Momen Spektra Gelombang	63
4.2.6 Perhitungan Kecepatan Arus Efektif.....	66
4.2.7 Perhitungan Parameter VIV	67
4.2.7.1 Perhitungan <i>Reynold Number</i>	67
4.2.7.2 Perhitungan Stabilitas Parameter	69
4.2.7.3 Perhitungan <i>Reduced Velocity</i>	69

4.2.7.4 Perhitungan <i>Keulegan-Carpenter</i>	70
2.2.7.5 VIV Amplitude	71
4.2.8 Perhitungan Beban Hidrodinamis	72
4.2.8.1 Perhitungan Gaya <i>Drag</i>	72
4.2.8.2 Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	73
4.2.9 Perhitungan Panjang <i>Span</i> Efektif	73
4.2.10 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa	74
4.2.10.1 Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i> (Pcr)	74
4.2.10.2 Defleksi	75
4.2.11 Analisa Frekuensi <i>Vortex Shedding</i>	76
4.2.12 Perhitungan Tegangan Dinamis	77
4.2.13 Analisa <i>Allowable Free Span Length</i>	78
4.2.14 <i>Screening Vortex Induced Vibration</i> (VIV)	79
4.2.15 <i>Screening Kriteria Free Span</i>	79
4.2.16 Simulasi dengan Software ANSYS Fluent	83
4.2.17 Simulasi Monte Carlo	92
4.2.17.1 Penentuan Variabel Acak	93
4.2.17.2 Parameter Statistik	93
4.2.17.3 Hasil Simulasi Monte Carlo	93
4.2.18 Mitigasi	95
BAB 5.....	96
KESIMPULAN.....	96
5.1 Kesimpulan	96
5.2 Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA	97
 LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi pipelines mengalami Free Span	13
Gambar 1.2 Ilustrasi <i>Vortex Induced Vibration</i> pada pipelines.....	14
Gambar 2.1 Jenis <i>free span</i> pada pipa bawah laut	18
Gambar 2.2 Grafik <i>Reduction Factor</i>	24
Gambar 2.3 Ilustrasi gaya lift pada Offshore Pipeline.....	29
Gambar 2.4 Ilustrasi Osilasi akibat Vortex.....	30
Gambar 2.5 <i>Qualitative behaviours of fluid flow over a cylinder depends to Reynolds Number</i>	33
Gambar 2.6 Faktor Melakukan Mitigasi pada Span Kritis	41
Gambar 2.7 Diagram Alir Keandalan dengan Simulasi <i>Monte Carlo</i>	48
Gambar 4.1 Peta Lokasi Platform Milik PT. X.....	55
Gambar 4.2 Karakteristik Respon <i>Free Span</i>	61
Gambar 4.3 <i>Qualitative Behaviours of Fluid Flow Over a Cylinder Depends to Reynolds Number</i>	68
Gambar 4.4 Grafik Amplitudo In-Line	71
Gambar 4.5 Grafik Amplitudo Cross Flow	72
Gambar 4.6 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 49.9 m (<i>Contour</i>).....	84
Gambar 4.7 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 49.9 m (<i>Streamline</i>)	85
Gambar 4.8 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 49.9 m (Grafik CD)	85
Gambar 4.9 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 42.9 m (<i>Contour</i>).....	86
Gambar 4.10 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 42.9 m (<i>Streamline</i>)	86
Gambar 4.11 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 42.9 m (Grafik CD)	87
Gambar 4.12 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 33.9 m (<i>Contour</i>).....	87
Gambar 4.13 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 33.9 m (<i>Streamline</i>)	88
Gambar 4.14 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 33.9 m (Grafik CD)	88
Gambar 4.15 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 34.8 m (<i>Contour</i>).....	89
Gambar 4.16 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 34.8 m (<i>Streamline</i>)	89
Gambar 4.17 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 34.8 m (Grafik CD)	90
Gambar 4.18 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 31.8 m (<i>Contour</i>).....	90

Gambar 4.19 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 31.8 m (<i>Streamline</i>)	91
Gambar 4.20 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 31.8 m (Grafik CD)	91
Gambar 4.21 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo</i> (Peluang Kegagalan)	94
Gambar 4.22 Hasil Simulasi <i>Monte Carlo</i> (Peluang Keandalan)	95

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 General safety factor (DNV RP F105).....	35
Tabel 2.2 Koefisien Kondisi Batas (DNV RP F105).....	36
Tabel 4.1 Data Dimensi Pipa.....	56
Tabel 4.2 Data Lingkungan Pipa	56
Tabel 4.3 Data <i>Post-Lay Survey</i>	57
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Dimensi Pipa.....	58
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa	59
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Massa Efektif Pipa.....	59
Tabel 4.7 Hasil <i>Screening Response Model</i>	60
Tabel 4.8 Parameter Perhitungan JONSWAP	62
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Kecepatan Arus Total	66
Tabel 4.10 Parameter Perhitungan VIV	67
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan <i>Reynolds Number</i>	67
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Stabilitas Parameter	69
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Reduced Velocity Cross-Flow dan In-Line	70
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan <i>Keulegan-Carpenter</i>	70
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Gaya <i>Drag</i>	72
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Gaya Lift.....	73
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Critical Buckling Load.....	74
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Defleksi.....	75
Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Frekuensi Natural	75
Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Frekuensi Vortex Shedding	76
Tabel 4.21 Hasil Perhitungan Tegangan Dinamis <i>Cross Flow</i>	77
Tabel 4.22 Hasil Perhitungan Tegangan Dinamis <i>In Line</i>	77
Tabel 4.23 Perhitungan Allowable Free Span Length kondisi cross flow	78
Tabel 4.24 Perhitungan <i>Allowable Free Span Length</i> kondisi in-line	78
Tabel 4.25 Hasil <i>Screening VIV</i>	79
Tabel 4.26 Hasil <i>Screening Kriteria</i> (Frekuensi Natural dan <i>Vortex Shedding</i>) <i>Cross Flow</i>	80

Tabel 4.27 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (<i>Allowable Span Length</i>) <i>Cross Flow</i>	80
Tabel 4.28 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (<i>Critical Buckling Load</i>) <i>Cross Flow</i>	80
Tabel 4.29 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (Defleksi) <i>Cross Flow</i>	81
Tabel 4.30 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (Gap Span) <i>Cross Flow dan In Line</i>	81
Tabel 4.31 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (Frekuensi Natural dan <i>Vortex Shedding</i>) <i>In Line</i>	82
Tabel 4.32 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (<i>Allowable Span Length</i>) <i>In Line</i>	82
Tabel 4.33 Hasil <i>Screening</i> Kriteria (Defleksi) <i>In Line</i>	83
Tabel 4.34 Tabel Validasi Gaya <i>Drag</i> Manual dan ANSYS Fluent	92
Tabel 4.35 Variabel Acak Simulasi Monte Carlo	93
Tabel 4.36 Parameter Statistik.....	93
Tabel 4.37 Hasil Simulasi Monte Carlo	93
Tabel 4.38 Peluang Keandalan	94

DAFTAR NOTASI

$S_{\eta\eta}(\omega)$	= Spektrum JONSWAP	
α	= Konstanta <i>Generalized Phillips</i>	
g	= Percepatan gravitasi	(m/s ²)
ω	= Frekuensi gelombang	(rad/s)
ω_p	= Frekuensi puncak gelombang	(rad/s)
γ	= Parameter ketinggian	
σ	= Parameter lebar spektra	
U_w	= Kecepatan arus akibat gelombang normal terhadap pipa	(m/s)
U_c	= Kecepatan arus steady normal tegak lurus terhadap pipa	(m/s)
D	= Diameter luar pipa	(m)
ID	= Diameter dalam pipa	(m)
t_{coat}	= Tebal coating	(m)
$t_{concrete}$	= Tebal concrete	(m)
t	= Ketebalan pipa	(m)
A_{pipa}	= Luas penampang melintang pipa	(m ²)
A_i	= Luas penampang bagian dalam pipa (<i>internal cross section</i>)	(m ²)
I_{conc}	= Momen inersia lapisan beton	(m ⁴)
I_{steel}	= Momen inersia pipa baja	(m ⁴)
E_{conc}	= Modulus elastisitas lapisan beton	(N/m ²)
E_{steel}	= Modulus elastisitas pipa baja	(N/m ²)
L_{eff}	= Panjang span efektif	(m)
m_p	= Massa pipa termasuk <i>coating</i> per satuan panjang	(kg/m)
m_k	= Massa fluida dalam pipa per satuan panjang	(kg/m)
m_a	= Massa yang di tambahkan per satuan panjang	(kg/m)
$M_{struktur}$	= Massa total struktur pipa	(kg/m)
$M_{concrete}$	= Parameter kekasaran <i>seabed</i>	(kg/m)

m_e	=Massa efektif pipa per satuan panjang	(kg/m)
ρ	=Massa jenis fluida	(kg/m ³)
C_a	=Koefisien massa yang ditambahkan	(m/s)
K_s	= <i>Stability parameter</i>	
C	=Koefisien kondisi batas	
CSF	= <i>Concrete stiffness enhancement factor</i>	
S_{eff}	=Gaya aksial efektif per satuan panjang	(N/m)
P_{cr}	=Critical Buckling Load	(N/m)
δ	=Defleksi statis	(m)
q	=Beban berupa berat terendam pipa atau gaya hidrodinamis	(N/m)
V_R	= <i>Reduced velocity</i>	
KC	=Bilangan <i>Keulegan Carpenter</i>	
f_w	=Frekuensi gelombang	(rad/s)
I_c	=Intensitas turbulensi	
S_{IL}	= <i>Stress range</i> pada arah <i>in-line</i> VIV	(N/m ²)
A_{IL}	= <i>Unit amplitude stress</i> , tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi <i>in-line</i>	(N/m ²)
R_k	=Faktor reduksi amplitudo akibat adanya <i>damping</i> /redaman	(N/m ²)
$\psi\alpha_{,IL}$	=Faktor koreksi untuk rasio kecepatan aliran arus	(N/m ²)
$A_{\gamma/D}$	=Amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah <i>in-line</i> VIV	
S_{CF}	= <i>Stress range</i> pada arah <i>cross-flow</i> VIV	(N/m ²)
A_{CF}	= <i>Unit amplitude stress</i> , tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi <i>cross-flow</i>	(N/m ²)
A_z/D	=Amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah <i>cross-flow</i>	

BAB I

PENDAHULUAN

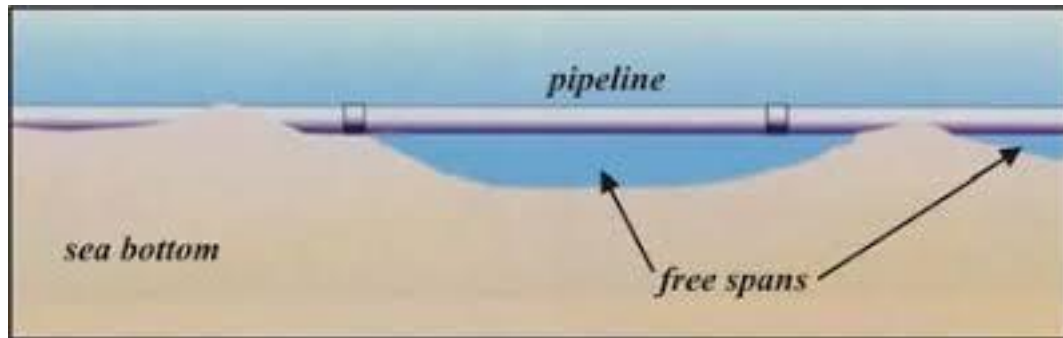
1.1 Latar Belakang

Minyak bumi sebagai sumber energi utama untuk industri, transportasi dan rumah tangga dan sumber devisa negara. Kebutuhan terhadap minyak dan gas bumi tiap tahun mengalami peningkatan dan cadangan minyak Indonesia mengalami penurunan. Sekarang, kebutuhan minyak dan gas memiliki selisih besar dengan jumlah pasokannya. Eksplorasi di darat semakin banyak sehingga persediaan minyak dan gas bumi terus berkurang. Sesuai berjalannya waktu, eksplorasi minyak dan gas telah berpindah ke lepas pantai, dan dibutuhkan teknologi-teknologi baru yang dapat menunjang eksplorasi. Teknologi yang tinggi dibutuhkan dalam eksplorasi minyak dan gas pada lepas pantai. Persiapan dan perencanaan yang tepat adalah hal yang mutlak dalam setiap perencanaan pekerjaan lepas pantai. Distribusi minyak dan gas dari lepas pantai ke darat dapat melalui 2 cara, oleh kapal atau pipa bawah laut. Penentuan menggunakan pipa atau kapal ditentukan berdasarkan segi ekonomi, lebih efisien menggunakan pipa atau kapal.

Dalam industri minyak dan gas, *offshore pipelines* digunakan untuk memindahkan produk hidrokarbon dari lokasi pengeboran menuju fasilitas produksi (Kenny, Shawn 2018). Dibandingkan dengan alat transportasi pemindahan hidrokarbon lain, pipa bawah laut lebih stabil dan memiliki kapasitas tinggi sampai ke ujung pipa. Menurut (Botros, Hardeveld dkk 2002), transportasi menggunakan pipeline memiliki keuntungan well-established, efektif pada segi ekonomi, mudah di perluas. Harga untuk proyek pipelines dipengaruhi oleh diameter dan panjang, dari faktor-faktor geografi dan topografi.

Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada pipa bawah laut adalah terbentuknya bentangan bebas atau disebut free span (Putra, Wahyu 2014). *Free span* terjadi akibat ketidak-rataan permukaan dasar laut, sehingga bentang pipa akan menggantung pada 2 tumpuan (Puspi, Ratna 2008). Terjadinya *free span* merupakan suatu kerugian serta menimbulkan ancaman bagi jalur pipa itu sendiri

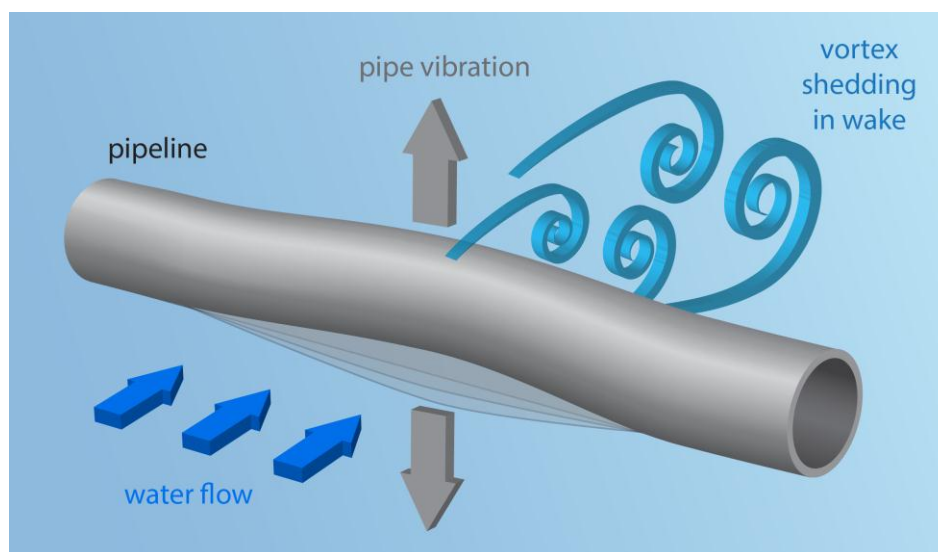
(Prayoga, D. 2012). Dapat terganggunya stabilitas pada jalur pipa yang dalam jangka panjang dapat menyebabkan pipa mengalami stress dan bending. Analisa free span ini mengacu pada DNV RP F105.



Gambar 1.1 Ilustrasi pipelines mengalami Free Span

(sumber: Georgiadou, Angelides dkk 2014)

Free span harus mendapat perhatian khusus dalam proses desain pipa bawah laut karna pada kondisi ini dapat menyebabkan vibrasi atau disebut sebagai *Vortex Induced Vibration* (VIV) (Andyanto, Senna 2011). VIV terjadi karna adanya aliran yang mengenai benda berbentuk silinder, maka aliran tersebut menimbulkan osilasi dan menambah kecepatan fluida yang awalnya merupakan aliran simetri menjadi tidak simetri sehingga terbentuk getaran akibat adanya kombinasi gerakan gelombang dan arus (Walujo, Murdjito dkk 2012). Dahulu, VIV tidak diperbolehkan terjadi selama masa umur desain pipeline. Tetapi, sekarang VIV sudah dapat diterima selama tidak melebihi kerusakan fatigue pipa.



Gambar 1.2 Ilustrasi *Vortex Induced Vibration* pada pipelines

(sumber: www.exponent.com)

Akibat adanya VIV, diperlukan perhitungan keandalan untuk mengetahui apakah pipa andal terhadap adanya VIV. Panjang bentangan bebas pada pipa tidak boleh melebihi panjang span yang diijinkan akibat VIV. Ketika span mengalami kondisi kritis dan tidak andal maka pipa memerlukan adanya *support*. *Support* untuk mengurangi panjang span sehingga efek VIV pada pipa berkurang.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa panjang span (bentangan) maksimum yang diijinkan?
2. Berapa tegangan dinamis pipa bawah laut akibat adanya Vortex Induced Vibration (VIV)?
3. Bagaimana keandalan pipa akibat Vortex Induced Vibration (VIV)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan panjang bentangan maksimum yang diizinkan.
2. Mendapatkan besar tegangan freespan pipa bawah laut akibat adanya Vortex Induced Vibration (VIV).
3. Mendapatkan keandalan pipa akibat Vortex Induced Vibration (VIV).

1.4 Batasan Masalah

Batasan dilakukan untuk menghindari pembahasan yang melebar dengan membatasi masalah berdasarkan asumsi sebagai berikut:

1. Data offshore *pipeline* yang digunakan data milik PT. X di selat Madura dengan data Diameter luar pipa 20"
2. Pipa yang di analisis dari KP 0 – KP 1.3.
3. Analisa panjang free span yang diizinkan menggunakan code DNV RP F-105 (*Free Spanning Pipeline*).
4. Tumpuan pada free span diasumsikan tumpuan *fixed-fixed*.
5. Analisis hanya saat pipa kondisi operasi tanpa *Marine Growth*
6. Arah aliran tegak lurus dengan pipa.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini diharapkan akan diketahui besarnya pengaruh VIV pada *freespan* pipa bawah laut. Memberikan kemampuan dalam menganalisa keandalan ya dan metode mitigasinya pada pipa bawah laut milik PT. X . dan dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan oleh pihak lain dalam menganalisa pipa bawah laut.

1.6 Sistem Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini terdiri atas lima bab yaitu sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini berisi hal-hal umum yang melatarbelakangi penulisan tugas akhir. Pada bab ini berisi latar belakang, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistem penulisan tugas akhir.

BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini menjelaskan mengenai tinjauan pustaka berupa penelitian-penelitian yang memiliki tema terkait dengan tema tugas akhir yaitu mitigasi *upheaval buckling* dan perhitungan yang berhubungan dengan *upheaval buckling*. Selain itu, bab ini juga menjelaskan mengenai teori-teori dan asumsi yang digunakan untuk perhitungan dan analisa.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi penjelasan mengenai urutan-urutan pengerjaan dalam penelitian tugas akhir beserta waktu dan lokasi pengerjaan tugas akhir.

BAB IV Analisis Hasil dan Pembahasan

Bab ini memberikan penjelasan tentang studi kasus yang dibahas dalam tugas akhir ini. Pada analisis hasil akan dibahas mengenai hasil perhitungan yang dilakukan beserta permodelan yang diangkat dalam kepenulisan. Kemudian hasil dari perhitungan dan analisis tersebut akan ditinjau kembali berdasarkan teori, *codes and standard*, untuk mengetahui kebenaran hasil.

BAB V Kesimpulan Dan Saran

Bab ini memberikan penjelasan mengenai kesimpulan dari analisis dan perhitungan yang telah dilakukan serta memberikan saran terhadap permasalahan sebagai pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Free span (bentangan bebas) adalah salah satu permasalahan yang sering terjadi pada pipa bawah laut. *Free span* terjadi akibat ketidak-rataan permukaan dasar laut, sehingga bentang pipa akan menggantung pada 2 tumpuan (Puspi, Ratna 2008). Menurut (Prayoga, D. 2012)., terjadinya *free span* merupakan suatu kerugian serta menimbulkan ancaman bagi jalur pipa itu sendiri. Sehingga, diperlukan analisa perhitungan yang teliti dan tepat. *Allowable free span length* adalah panjang bentangan bebas yang diizinkan untuk suatu pipa, ketika panjang bentangan bebas melebihi yang diizinkan dapat terjadi *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang mengakibatkan kegagalan pipa tersebut karena arus dan gelombang. VIV adalah aliran fluida yang mengalami osilasi atau pusaran dan menghasilkan getaran pada struktur tersebut. Osilasi biasanya mengalir sejajar dengan arah aliran yang disebut osilasi *in-line* , atau tegak lurus dengan arah aliran yang disebut osilasi *cross-flow*.

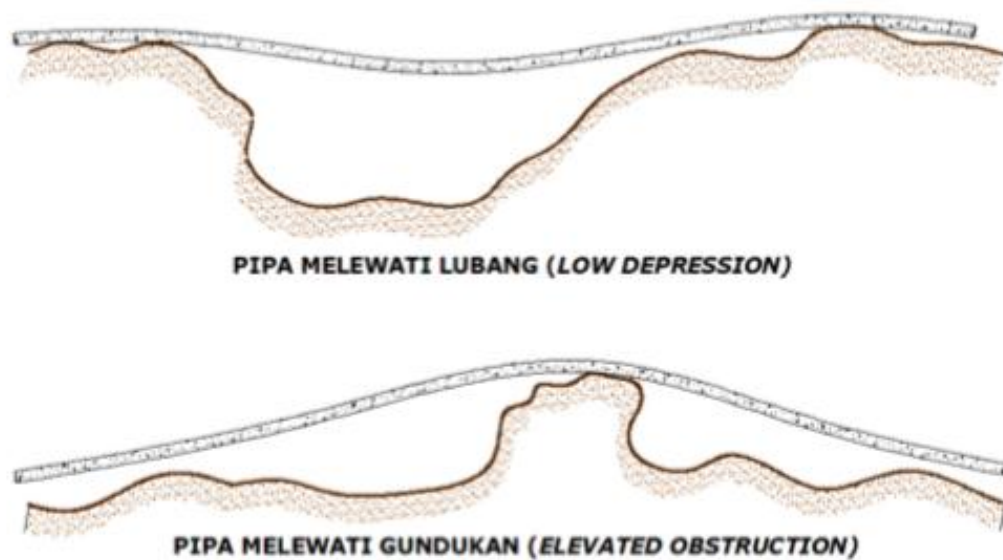
Akibat adanya VIV, diperlukan analisis keandalan pipa tersebut terhadap VIV. Dengan menghitung peluang kegagalan pipa akibat VIV dan menemukan keandalannya. Panjang bentangan bebas pada pipa tidak boleh melebihi panjang span yang diijinkan akibat VIV. Ketika panjang span melebihi panjang yang diijinkan maka pipa memerlukan adanya *support*. *Support* untuk mengurangi panjang span atau berupa *suppression device* untuk meredam terjadinya VIV. Untuk suppression device yang paling sering digunakan adalah *helical strakes*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pipa Bawah Laut

2.2.2 *Free Span*

Salah satu permasalahan yang umum pada pemasangan pipa bawah laut adalah *Free Span*. *Free span* atau yang disebut juga bentangan bebas adalah kondisi dimana ketidakrataan seabed membuat pipa bertumpu hanya pada 2 tumpuan dan pipa menggantung. *Free span* pipa juga dapat terjadi karna persimpangan (*crossing*) pipa. Dan mengakibatkan kelebihan tegangan, stress yang berulang dapat berefek kegagalan atau kelelahan. Beban yang terjadi pada pipa diakibatkan oleh gaya pipa itu sendiri, gaya dinamik dari beban lingkungan (gelombang, arus laut).



Gambar 2.1 Jenis *free span* pada pipa bawah laut

(Sumber: Bai, Y, 2001)

2.2.2 DNV RP F-105

DNV RP F-105 (*Free Spanning Pipelines*) adalah turunan dari DNV GL14 yang membahas mengenai kalkulasi teknis dalam perancangan *pipeline* yang berfokus pada analisa *free spanning* dan frekuensi natural dari struktur. DNV RP F-105 banyak menjadi acuan utama dalam kalkulasi perancangan *pipeline*. DNV RP F-105 akan menjadi acuan perhitungan dalam tugas akhir ini.

2.2.3 Kondisi Pembebanan

Selama umur desain pipa bawah laut, ada 4 jenis kondisi pembebanan, antara lain (Kenny, 1993) :

2.2.3.1 Instalasi

Instalasi pipa bawah laut mendapatkan banyak pengaruh dalam proses instalasinya, dari tekanan air laut, kecepatan arus, besarnya gelombang, dan faktor kedalaman laut yang berbeda-beda (Habibi dkk, 2018). Tegangan yang terjadi pada kondisi ini dipengaruhi oleh metode instalasi yang digunakan.

2.2.3.2 Terisi Air

Kondisi ini terjadi sebelum dan sesudah tahap *hydrotest*. Kondisi ini terjadi pada fase dimana pipa untuk sementara ditinggalkan. Pada kondisi ini air laut akan masuk kedalam pipa sehingga menambah beban pipa itu sendiri. Beban hidrodinamis juga bekerja pada kondisi ini.

2.2.3.3 Hydrotest

Kondisi *hydro test* dilakukan untuk menguji kekuatan pipa dengan memberikan tekanan yang besar kedalam pipa. Beban yang mempengaruhi adalah tekanan dalam pipa (*internal pressure*) dan tentunya berat pipa yang bertambah akibat adanya air laut.

2.2.3.4 Operasi

Setelah instalasi dan *hydrotest*, berikutnya adalah fase operasi, dimana pipa mulai digunakan untuk mengalirkan fluida yang ditentukan. Tekanan dalam yang serta temperatur yang sangat tinggi akan mempengaruhi formasi dan tegangan pada pipa.

2.2.4 Jenis - Jenis Pembebanan

Menurut Kenny (1993), beban yang bekerja pada pipa dibagi menjadi 2 kategori, antara lain :

2.2.4.1 Functional Load

Beban fungsional ini merupakan beban yang bekerja pada pipa sebagai akibat dari keberadaan pipa itu sendiri tanpa dipengaruhi oleh beban lingkungan. Beban fungsional antara lain adalah beban dari berat pipa itu sendiri, termasuk berat struktur baja pipa, berat lapisan anti korosi, lapisan selubung beton, beban akibat tekanan dalam yang diberikan pada pipa, beban akibat suhu yang cukup tinggi di dalam pipa, serta beban akibat sisa instalasi.

2.2.4.2 Environmental Load

Beban ini bekerja pada pipa akibat adanya kondisi lingkungan yang terjadi. Untuk beban pada pipa bawah laut, tentunya yang mempengaruhi adalah beban gelombang dan arus. Untuk mendapatkan data beban lingkungan yang tentunya bersifat acak, maka data yang digunakan untuk analisa adalah data dengan periode ulang (*return period*). Periode ulang merupakan data rata-rata beban yang terjadi.

Adapun macam-macam beban siklis yaitu (Djarmiko, 2003) :

1. Beban siklis frekuensi rendah (*quasi-statis*) yang ditimbulkan oleh eksitasi gelombang dengan jumlah sekitar 10^7 s/d 10^8 kali selama umur operasi struktur (20 tahun).
2. Beban siklis frekuensi tinggi (dinamis), yang dapat diklasifikasikan menjadi beban transient (*slamming, wave slepping, hull whipping*) dan *steady* (mesin baling-baling, *hull springing*) dengan jumlah sekitar 10^9 kali selama umur operasi struktur (20 tahun).
3. Beban siklis frekuensi sangat rendah (statis) akibat perubahan beban (logistik) di atas struktur dan hidrostatik (pasut) dengan jumlah sekitar 4000-8000 kali selama umur operasi struktur (20 tahun).
4. Beban siklis karena *gradient* panas tidak beraturan akibat cuaca dan temperatur muatan dengan jumlah 7000 kali selama umur operasi struktur (20 tahun).

2.2.5 Beban Gelombang

2.2.5.1 Teori Gelombang

Menurut Djatmiko (2012), gelombang laut mempunyai pola acak dalam elevasi dan propagasinya, yang tidak akan berulang urutan kejadiannya terutama di lokasi yang sama. Dengan demikian teori gelombang reguler tidak dapat dipakai secara langsung dalam menjelaskan gelombang acak.

Gelombang yang mengakibatkan kondisi aliran berosilasi dapat dihitung dengan menggunakan teori numerik atau analisi gelombang. Teori gelombang harus dapat mendeskripsikan kondisi di lokasi pipa. Untuk kasus yang praktis, teori gelombang linear dapat diterapkan. Kondisi laut yang acak, stasioner, dan kurun waktu pendek dapat digunakan dengan spektrum gelombang. Spektrum gelombang yang sering digunakan adalah JONSWAP.

2.2.5.2 Spektra Gelombang JONSWAP

Jonswap adalah singkatan dari *Joint North Sea Wave Project* yaitu proyek yang dilakukan secara bersama sama oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian tentang gelombang di laut atau perairan utara (Djatkiko,2012). Persamaan spektra JONSWAP diberikan sebagai berikut:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.1)$$

a. Konstanta *Generalized Phillips* diberikan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad (2.2)$$

b. Parameter Lebar Spektra:

$$\sigma = 0.07 \quad \text{if } \omega \leq \omega_p \quad (2.3)$$

$$\sigma = 0.09 \quad \text{else} \quad (2.4)$$

c. Peak Enhancement Factor:

$$\gamma = \begin{cases} 5.0 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5.0; \\ 1.0 & \varphi \geq 5.0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.5)$$

Keterangan :

$S_{\eta\eta}(\omega)$ = Spektrum JONSWAP

α = Konstanta *Generalized Phillips*

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

ω_p = Frekuensi puncak gelombang(rad/s)

γ = Parameter ketinggian

σ = Parameter lebar spektra

2.2.5.3 Transformasi Spektra Gelombang

Wave induced velocity pada pipa dasar laut $S_{\eta\eta}(\omega)$ ditentukan dengan transformasi spektra gelombang pada permukaan menggunakan teori gelombang orde 1:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.6)$$

$G^2(\omega)$ merupakan fungsi transformasi frekuensi dari elevasi gelombang menjadi kecepatan arus karena gelombang pada level pipa di dasar laut, diberikan sebagai berikut:

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k d)} \quad (2.7)$$

Dimana d adalah kedalaman laut dan k adalah angka gelombang yang ditentukan dengan iterasi persamaan *transcendental* yaitu:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(k d) \quad (2.8)$$

Momen spektra pada orde ke – n diberikan sebagai berikut:

$$(2.9)$$

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{UU}(\omega) d\omega$$

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa diberikan pada persamaan berikut:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.10)$$

Mean zero up-crossing period dari osilasi aliran pada pipa adalah:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.11)$$

Pengaruh dari arah gelombang dan sebaran gelombang akan membentuk *reduction factor* dalam kecepatan signifikan aliran. Kecepatan normal untuk pipa dan pengaruh dari sebaran gelombang adalah sebagai berikut:

$$U_w = R_D U_{w\theta} \quad (2.12)$$

Untuk menghitung *reduction factor* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_D = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_w \theta d\theta} \quad (2.13)$$

Beban hidrodinamika dapat ter reduksi dikarenakan:

- Dasar laut yang *permeable*
- Pipa yang ter penetrasi ke dasar laut
- Trenching

Maka total beban yang ter reduksi adalah:

$$r_{tot,i} = r_{perm,i} \cdot r_{pen,i} \cdot r_{tr,i} \quad (2.14)$$

2.2.5.4 Kecepatan Arus

a. Kecepatan Arus Efektif pada Pipa

Kecepatan efektif yang bekerja pada pipa merupakan kombinasi dari kecepatan arus dan kecepatan gelombang. Maka

kecepatan partikel air efektif yang bekerja pada pipa dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$U_e = U_w + U_c \quad (2.15)$$

dimana,

U_w = Kecepatan arus akibat gelombang normal terhadap pipa (m/s)

U_c = Kecepatan arus *steady* normal tegak lurus terhadap pipa (m/s)

b. Kecepatan Arus

Sehingga, arus tegak lurus yang menghasilkan kecepatan aliran arus pada posisi pipa dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

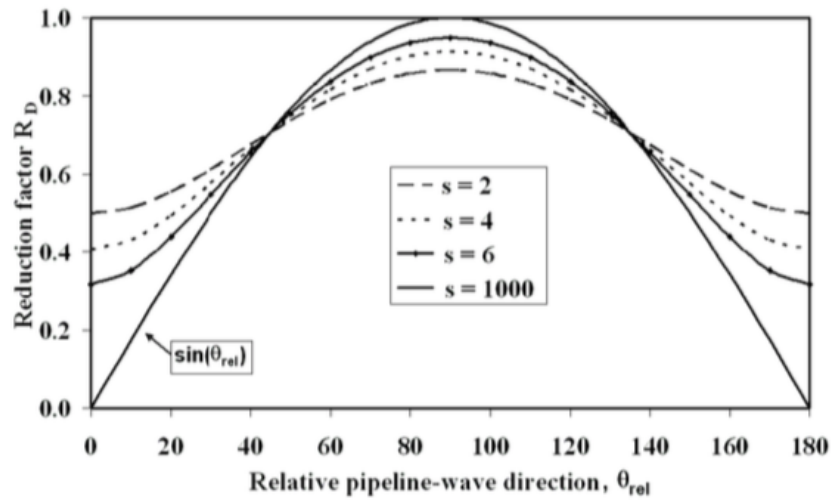
$$U_c = R_c \cdot U(z_r) \frac{\ln(e + \frac{D}{2}) - \ln z_0}{\ln(z_r) - \ln z_0} \quad (2.16)$$

c. Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Dan efek dari arah gelombang dapat di proyeksikan ke kecepatan gelombang normal terhadap pipa dan penyebaran gelombang dalam bentuk *reduction factor* pada kecepatan gelombang signifikan. Sehingga, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$U_w = U_s R_D \quad (2.17)$$

Saat, θ_{rel} adalah sudut antara arah *pipeline* dan arah gelombang dan didapatkan R_D dari grafik berikut ini:



Gambar 2.2 Grafik *Reduction Factor*

(sumber: DNVGL RP F105)

2.2.6 Perhitungan Umum Pipa

Sebelum menghitung untuk analisis pada pipa bawah laut, perlu dilakukan perhitungan umum yang menjadi dasar dari semua analisis perhitungan pipa bawah laut. Berikut perhitungan-perhitungan umum yang perlu dilakukan:

2.2.6.1 Analisa Dimensi Pipa

Offshore pipelines terdiri dari beberapa lapisan yaitu, pipa baja, *anti-corrosion coating*, lapisan pemberat (*concrete*). Pipa dalam schedule NPS hanya terdiri lapisan baja, tidak dengan *anti-corrosion coating* dan *concrete*. Pipa yang di analisa harus menggunakan diameter total dan dimensi pipa yang lain. Parameter-parameter dimensi pipa dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

a. *External pipe diameter*

$$D = ID + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{concrete}) \quad (2.18)$$

dengan,

D = Diameter luar pipa (m)

ID = Diameter dalam pipa (m)

t_{coat} = Tebal coating (m)

$t_{concrete}$ = Tebal concrete
(m)

b. *Internal cross section area*

$$A_i = \frac{\pi}{4} \times (D - (2 \times t_{pipa}))^2 \quad (2.19)$$

c. *Steel pipe cross section area*

$$A_{pipa} = \frac{\pi}{4} \times D^2 - A_i \quad (2.20)$$

d. *Coating layer cross section area*

$$A_{coat} = \frac{\pi}{4} \times (D + (2 \times t_{coat}))^2 - A_i - A_{pipa} \quad (2.21)$$

e. *Concrete cross section area*

$$A_{concrete} = \frac{\pi}{4} x (D + (2 x t_{coat}) + (2 x t_{concrete})) - A_i - A_{pipa} - A_{coat} \quad (2.22)$$

2.2.6.2 Massa Efektif

Massa efektif pipa adalah total dari masa pipa termasuk coating, massa fluida dalam pipa dan massa air laut yang dipindahkan oleh pipa.

Menurut (Guo dkk, 2005), persamaan massa efektif pipa adalah sebagai berikut:

$$M_e = M_{str} + M_c + M_A \quad (2.23)$$

Dimana,

M_e = Massa efektif

M_{str} = Massa pipa termasuk coating (kg/m)

M_c = Massa Konten (kg/m)

M_A = Massa tambah = $0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot C_A$

C_A = Koefisien massa tambah

Maka, dianggap bahwa seluruh span mengalami osilasi dan vortex shedding, sehingga massa efektif dapat memiliki massa tambah seperti persamaan 10.4.

2.2.7 Berat Pipa Terendam

Analisa *submerged weight* pipa ini diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Berat pipa yang dihitung adalah berat material (baja), berat muatan pipa (dalam kondisi operasi), berat *coating*, berat *concrete*, berat akibat *bouyancy*.

Berat pipa dihitung sebagai berikut:

$$W_{pipa} = M_{pipa} \times 9,8067 \quad (2.24)$$

Berat *coating* dihitung sebagai berikut:

$$W_{coating} = M_{coating} \times 9,8067 \quad (2.25)$$

Berat *concrete* dihitung sebagai berikut:

$$W_{concrete} = M_{concrete} \times 9,8067 \quad (2.26)$$

Berat muatan dihitung sebagai berikut:

$$W_{fluida} = M_{fluida} \times 9,8067 \quad (2.27)$$

Submerged weight pipa dihitung sebagai berikut:

$$Q = W_{pipa} + W_{coating} + W_{concrete} + W_{fluida} - W_{buoy} \quad (2.28)$$

2.2.8 Beban Hidrodinamis

2.2.8.1 Gaya Drag

Gaya *drag* terjadi akibat gesekan fluida dengan dinding struktur (*skin friction*) serta dan akibat vorteks di belakang struktur (*form drag*) (Anastasio, 2007). Sebagian

besar gaya *drag* disebabkan karena vorteks. Komponen gaya *drag* yang terbesar merupakan *form drag*.

Persamaan untuk mendapatkan gaya *drag* adalah :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{fluida} C_D U_e^2 \quad (2.29)$$

dengan,

ρ_{fluida} = massa jenis fluida (kg/m³)

C_D = Koefisien *Drag*

U_e^2 = Kecepatan efektif Partikel (m/sec)

Menurut DNV RP F-105, koefisien *drag* dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_D = C_D^0(k/D) \cdot \Psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \Psi_{proxi}^{CD} \cdot \Psi_{trench}^{CD} \cdot \Psi_{VIV}^{CD} \quad (2.30)$$

Dengan,

$C_D^0 = \text{Basic drag coefficient}$

$$C_D^0(k/D) = \begin{cases} 0.65 & ; k/D < 10^{-4} \text{ (smooth)} \\ 0.65 \cdot \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10}(k/D) \right) & ; 10^{-4} < k/D < 10^{-2} \\ 1.05 & ; k/D > 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases} \quad (2.30)$$

$\Psi_{KC}^{CD} = \text{Correction factor for the unsteadiness flow}$

$$\Psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & \alpha \leq 0.5 \\ 0.6 + \frac{6}{KC} & \alpha > 0.5 \end{cases} \quad 5 < KC < 40 \quad (2.31)$$

$\Psi_{proxi}^{CD} = \text{Correction factor for the seabed proximity}$

$$\Psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0.9 + \frac{0.5}{(1 + 5 \cdot (e/D))} & \text{for } e/D < 0.8 \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (2.32)$$

$\Psi_{trench}^{CD} = \text{Correction factor for the effect of pipe in trench}$

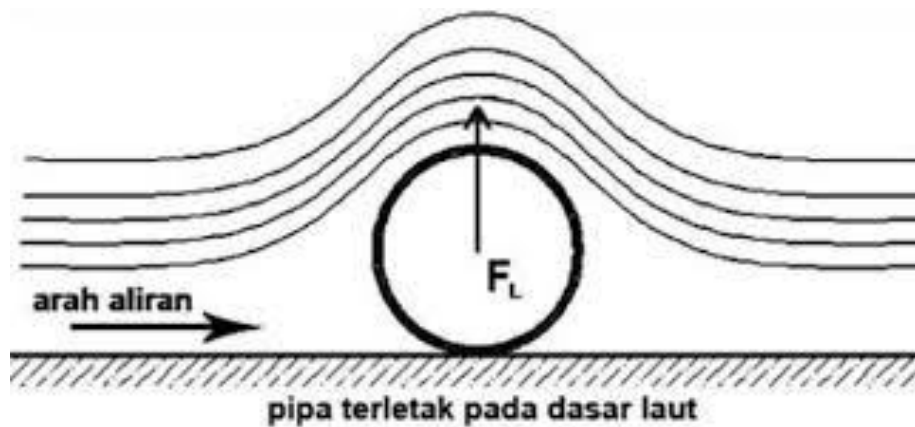
$$\Psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \quad (2.33)$$

$\Psi_{VIV}^{CD} = \text{Amplification factor due to vibrations}$

$$\Psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D} \right)^{0.65} \quad (2.34)$$

2.2.8.2 Gaya Lift

Gaya *lift* adalah gaya dalam arah tegak lurus aliran/rambatan gelombang. Gaya angkat terjadi bila terdapat perbedaan konsentrasi *streamline*. Jika terdapat konsentrasi *streamline* di atas silinder akan mengakibatkan gaya angkat. Jika terdapat celah sempit diantara silinder dan *seabed*, konsentrasi *streamline* bawah silinder akan mengakibatkan gaya angkat negatif ke arah bawah (Anastasio, 2007).



Gambar 2.3 Ilustrasi gaya lift pada Offshore Pipeline

(sumber: Ridlwan, Asfarur dkk 2017)

Besarnya gaya *lift* dapat diperoleh melalui persamaan :

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{\text{fluida}} C_L D U_e^2 \quad (2.35)$$

dengan,

ρ_{fluida} = Massa jenis fluida (kg/m³)

C_L = Koefisien *lift*

D = Diameter luar pipa (m)

U_e^2 = Kecepatan efektif Partikel (m/sec)

2.2.9 Vortex Induced Vibration (VIV)

Pembebanan pada pipa akan menimbulkan getaran yang cukup besar pada pipa. Getaran yang terjadi menghasilkan frekuensi pada pipa. Peristiwa yang terjadi akibat getaran tersebut disebut *Vortex Induced Vibration*(VIV). Osilasi pada pipa terdapat 2 jenis, yaitu:

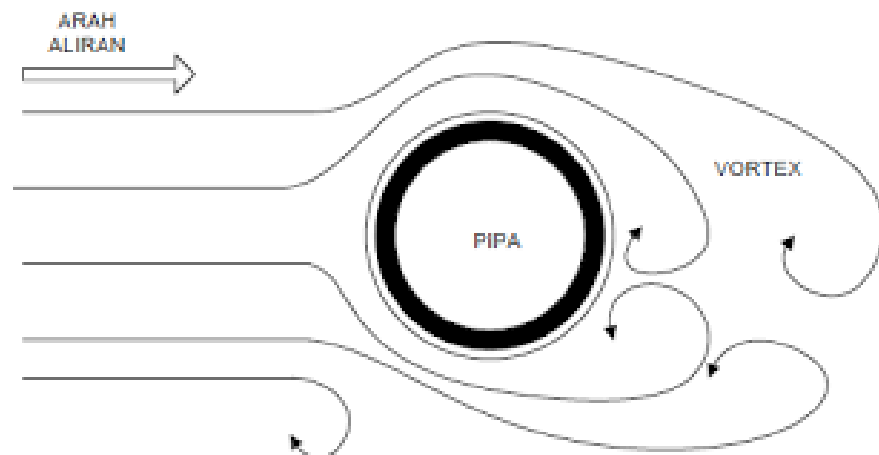
2.2.9.1 Osilasi *In-Flow*

Menurut (Guo dkk, 2005), *In-Line* osilasi terjadi karena kecepatan aliran lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan gerakan *cross flow*. Beberapa parameter digunakan untuk menghitung potensi-potensi terjadinya getaran. Termasuk, *reduced velocity* (U_r) dan *Stability Parameter* (K_s).

Ketidakstabilan *In-Line* dihubungkan dengan simetrisnya vortex shedding dan memiliki respon puncak pada *reduced velocity* (Ur). Untuk menghindari respon dari *in-line flow* terhadap eksitasi *vortex shedding*, disarankan memiliki *stability parameter* (K_s) lebih besar dari 1.8 (Wootton, 1991). Menurut (DNV,1981) , resonansi *in-line vortex shedding* yang menyebabkan osilasi dapat terjadi ketika $1.0 < Ur < 2.2$, *shedding* akan simetris; dan untuk $Ur > 2.2$, *shedding* akan bergantian.

2.2.9.2 Osilasi *Cross Flow*

Eksitasi di arah *cross flow* dapat memiliki efek yang lebih besar dibandingkan dengan osilasi *in-line* karena amplitude respon jauh lebih besar dibandingkan pada *in-line*. Dan juga, osilasi ini dapat menyebabkan kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan osilasi *in-line*. Menurut (DNV, 1981), untuk osilasi *cross flow* harus memiliki parameter kestabilan $K_s < 16$. Serta, untuk *reduced velocity* $3.5 < Ur < 10$.



Gambar 2.4 Ilustrasi Osilasi akibat Vortex

(sumber: Ridlwan, Asfarur dkk 2017)

2.2.10 Parameter VIV (*Vortex Induced Vibration*)

Untuk menentukan osilasi atau *vortex* yang terjadi di sekitar pipa, ada beberapa parameter yang mempengaruhi terjadinya *vortex*. Berikut parameter-parameter yang diperlukan untuk analisis *vortex* yang terjadi di sekitar pipa:

2.2.10.1 Stability Parameter (Ks)

Menurut Guo dkk. (2005), salah satu parameter penting dalam mengatur gerakan akibat *vortex* adalah *Stability parameter*. Parameter ini digunakan untuk menentukan respon maksimal akibat beban hidrodinamis, persamaannya adalah sebagai berikut :

$$K_S = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad (2.36)$$

dengan,

K_S = *Parameter Stability*

M_e = Massa efektif pipa (kg/m)

ζ_T = *Damping ratio*

ρ = density air laut (kg/m³)

D = diameter luar pipa (m)

Sedangkan, design stability parameter dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$K_{sd} = \frac{K_S}{\gamma_k} \quad (2.37)$$

dimana,

Total *damping* (ζ_T) biasanya dipertimbangkan dari gabungan *hydrodynamics damping*, *soil damping* dan *structural damping*.

2.2.10.2 Keulegan Carpenter

$$K_c = \frac{UT}{D} \quad (2.38)$$

dengan,

K_c = Kaulegan-Carpenter number

U = Kecepatan {artikel (m/s)}

T = Periode (s)

D = Diameter struktur (m)

Kaulegan Carpenter digunakan untuk mengetahui respon pipa terhadap VIV mengalami VIV signifikan atau tidak. Jika $K_C > 5$ maka VIV yang terjadi cukup signifikan. Jika $K_C > 30$ dan kecepatan arus lebih besar dibandingkan kecepatan gelombang maka *vortex shedding* akan terjadi pada saat aliran arusnya *steady*.

2.2.10.3 Reynolds Number

Bilangan Reynold adalah bilangan tak berdimensi yang ditemukan oleh Osborn Reynolds (1842-1916). Bilangan Reynolds mengindikasikan bentuk aliran yang terbentuk dan berhubungan dengan tahanan suatu benda yang merupakan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos. Bilangan Reynolds menunjukkan aliran turbulen dan digunakan untuk menentukan rentang *vortex shedding*. Bilangan Reynold itu sendiri dirumuskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{U_C D_{tot}}{V_K} \quad (2.39)$$

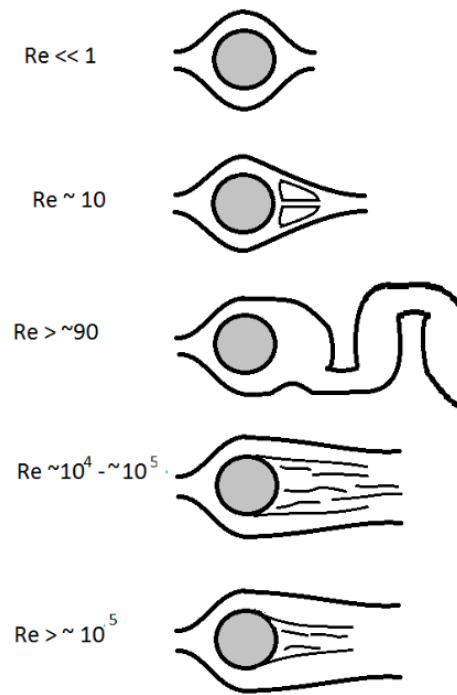
dengan ,

Re = Bilangan Reynolds

V_K = Viskositas kinematis fluida untu k air laut (m² /sec)

D = Diameter luar pipa (m)

U_c = Kecepatan efektif partikel (m/ sec)



Gambar 2.5 *Qualitative behaviours of fluid flow over a cylinder depends to Reynolds Number*

(sumber: www.chegg.com)

2.2.10.4 Reduced Velocity

Dalam Guo dkk. (2005), *reduced velocity* adalah kecepatan dimana osilasi akibat *vortex shedding* terjadi. Reduced velocity digunakan untuk penentuan pada kecepatan berapa terjadi getaran/osilasi akibat *vortex shedding* (Bai, 2001).

Persamaan *reduced velocity* adalah sebagai berikut :

$$V_R = \frac{U_c}{f_n D} \quad (2.40)$$

dengan,

V_R = Reduced Velocity (m/sec)

U_c = Kecepatan arus (m/sec)

f_n = Frekuensi natural pipa (Hz)

D = Diameter luar pipa (m)

Berdasarkan DNV RP F-105, Reduced Velocity dapat dihitung untuk kondisi *onset*. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

a. Cross Flow

Pada kondisi *cross flow*, *reduced velocity* pada kondisi *onset* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \times \psi_{proxy,onset} \times \psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad (2.41)$$

dengan,

$\Psi_{proxi,onset}$ = *Correction factor for the seabed proximity*

$$\Psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} \left(4 + 1.25 \frac{e}{D} \right) & \text{for } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (2.42)$$

$\Psi_{trench,onset}$ = *Correction factor for the effect of in/over a trench*

$$\psi_{trench,onset} = 1 + 0.5 \frac{\Delta}{D} \quad (2.43)$$

$$\frac{\Delta}{D} = \text{Relative Trench depth}$$

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1.25 \cdot d - e}{D} \quad (2.44)$$

dimana,

$$0 \leq \frac{\Delta}{D} \leq 1 \quad (2.45)$$

b. In-Line

Pada kondisi *in-line*, *reduced velocity inline* pada kondisi onset dapat ditentukan oleh persamaan berikut ini:

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{Untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{Untuk } 0.4 < K_{sd} \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{Untuk } K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad (2.46)$$

Dimana :

$\gamma_{on,IL}$ = *Safety factor pada onset inline*

K_{sd} = Parameter stabilitas untuk perancangan (= K_s / γ_k)

γ_k = *Safety factor* pada parameter stabilitas

Berdasarkan DNV RP F105, Screening

Tabel 2.1 General safety factor (DNV RP F105)

Safety factor	Safety class		
	Low	Normal	High
η	1	0.5	0.25
γ_k	1	1.15	1.3
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

2.2.11 Panjang Span Efektif

Perhitungan panjang span ini, memperhitungkan panjang efektif dari panjang span aktual. Perhitungan panjang span efektif ini dipengaruhi oleh ketinggian span (*gap*) juga. Panjang span efektif ditinjau dari arah *in-line* dan *cross flow*. Menurut DNV RP F105, untuk end-condition *fixed-fixed* $L_{eff}/L = 1$. Panjang span efektif dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63} & \text{for } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1} & \text{for } \beta < 2.7 \end{cases} \quad (2.47)$$

dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF)EI} \right) \quad (2.48)$$

2.2.12 Frekuensi Natural

Perhitungan frekuensi natural dari pipa dari arah *inline* maupun *crossflow* sebagai respon dinamikanya terhadap beban lingkungan dan operasi yang diterima. Berdasarkan DNV RP F105, berikut persamaan untuk menghitung frekuensi natural:

$$f_n = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF)} \times \sqrt{\frac{E_{pipa} \times I_{pipa}}{M_{eff} \times L_{eff}^4} \times \left(\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} \right) + \left(C_3 \times \left(\frac{\delta}{D_{tot}} \right)^2 \right) \right)} \quad (2.49)$$

dengan,

C_1 dan C_3 = Koefisien kondisi batas

CSF = *Concrete stiffness enhancement factor*

E_{pipa} = Modulus Young's untuk pipa (N/m²)

I_{pipa} = Momen inersia pipa (m⁴)

M_e = Massa efektif (kg/m)

L_{eff} = Panjang span efektif (m)

D = Diameter luar pipa (m)

S_{eff} = Gaya aksial efektif (N/m)

P_{cr} = *Critical Buckling Load* (N)

δ = Defleksi statis (m)

Kondisi batas (C1 – C6) dapat dilihat dari tabel sebagai berikut:

Tabel 2.2 Koefisien Kondisi Batas (DNV RP F105)

	Pinned-Pinned ²⁾	Fixed-Fixed ³⁾	Single span on seabed
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C_4	4.93	14.1	Shoulder: $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span: 8.6
C_5	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18(L_{eff} / L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C_6	5/384	1/384	1/384

Concrete stiffness enhancement factor (CSF) menunjukkan kekakuan lapisan *concrete* terhadap kekakuan pipa baja. Berikut persamaan untuk menghitung *Concrete Stiffness Factor*:

$$CSF = k_c \cdot \left(\frac{E.I_{conc}}{E.I_{steel}} \right)^{0.75} \quad (2.50)$$

Keterangan :

K_c = Konstanta empiris (0.33 untuk aspal dan 0.25 untuk PP/PE *coating*)

I = Momen Inersia ($\pi/64 \times (D^4 - d^4)$)

Berikut persamaan untuk menghitung Beban Euler berdasarkan DNV RP F105:

$$P_{cr} = (1 + CSF) \times C_2 \times \pi^2 \times E.I/L_{eff}^2 \quad (2.51)$$

Dimana :

C_2 = Koefisien kondisi batas

CSF = *Concrete stiffness enhancement factor*

E = Modulus young untuk pipa (N/m^2)

I = Momen inersia pipa (m^4)

L_{eff} = Panjang span efektif (m)

Defleksi statis adalah defleksi yang terjadi pada pipa yang mengalami bentangan bebas, akibat beban statis yang bekerja pada pipa, yaitu berat dari pipa itu sendiri (*self weight*) untuk *cross flow* dan gaya *drag* untuk *in line*. Defleksi statis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\delta = C_6 \cdot \frac{q \times L_{eff}^4}{E.I.(1+CSF)} \frac{1}{(1+\frac{S_{eff}}{P_{cr}})} \quad (2.52)$$

Dimana :

δ = Defleksi statis (m)

C_6 = Koefisien kondisi batas

q =Beban berat terendam pipa untuk *crossflow* dan gaya hidrodinamis untuk *in line*

L_{eff} atau panjang span efektif merupakan panjang ideal span. Untuk kondisi batas fixed-fixed $L_{eff} = L$.

Effective axial force (S_{eff}) adalah gaya yang bekerja sejajar pada poros baik berupa gaya tarik maupun gaya tekan. Berikut persamaan untuk menghitung *Effective axial force*:

$$S_{\text{eff}} = H_{\text{eff}} - \Delta P_i \cdot A_i \cdot (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_e \quad (2.53)$$

Dimana :

H_{eff} = Effective lay tension

ΔP_i = Internal pressure difference relative to laying

A_i = Pipe cross section area (m^2)

A_s = Pipe steel cross section area (m^2)

ΔT = Temperature difference relative to laying, (Design temperature – Ambient temperature) ($^{\circ}\text{C}$)

α_e = Temperature expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.13 Vortex Shedding Frequency

Apabila aliran melewati pipa, maka aliran yang terbentuk setelah melewati pipa tidak stabil, sehingga menyebabkan pipa berosilasi. Ketika aliran melewati pipa maka akan terjadi *flow separation* dan terbentuk vorteks di belakang pipa. *Vortex* tersebut akan menyebabkan perubahan tekanan hidrodinamis pada pipa. Frekuensi *Vortex* bergantung pada kecepatan aliran dan diameter pipa. *Freespan* mulai berisilasi ketika frekuensi dari *vortex shedding* sebesar 1/3 dari frekuensi natural dan vibrasi bentangan pipa. Sehingga untuk tujuan mendesain pipa, perbandingan frekuensi *vortex shedding* harus lebih kecil dari 0,7 kali frekuensi naturalnya agar tidak terjadi osilasi. Pendekatan *vortex shedding* yang mendekati frekuensi natural pipa, secara teoritis ini dapat mengakibatkan adanya resonansi yang terjadi pada *freespan*. Maka dari itu, adanya bentangan dari frekuensi *vortex shedding* yang akan mempercepat *stress* pada pipa dan berdampak lebih cepat terhadap kegagalan pada pipa. Jika frekuensi *vortex* mendekati sama dengan frekuensi *freespan* pipa, maka akan terjadi resonansi. Hal ini dapat menimbulkan kegagalan akibat kelelahan pada pipa. Kegagalan pada struktur pipa dapat dicegah dengan menjauhkan frekuensi *vortex-shedding* dengan frekuensi alami pipa, sehingga osilasi yang terjadi dapat diminimalkan.

Dalam Guo dkk. (2005), frekuensi *vortex shedding* adalah frekuensi dimana terjadi pusaran pada pipa. Persamaan frekuensinya adalah sebagai berikut:

$$f_s = \frac{SU_c}{D} \quad (2.54)$$

Dengan,

f_s = *Vortex shedding frequency*, Hz

S = *Strouhal Number*

U_c = Kecepatan arus efektif, m/s

D = diameter luar pipa, m

Dalam Guo (2005), *Strouhal Number* adalah frekuensi yang tak berdimensi (*dimensionless*) yang merupakan fungsi dari *reynold numbers* (Re). Dalam Mouselli (1981), *strouhal number* dapat dicari melalui persamaan :

$$S_t = \frac{0.21}{C_D^{0.75}} \quad (2.55)$$

dimana,

C_D = Koefisien *Drag*

Pola setiap aliran fluida berbeda untuk setiap Reynolds Number yang berbeda. Reynold number dapat digunakan untuk mengetahui kondisi aliran di sekitar struktur tersebut.

2.2.14 Tegangan Dinamis

Tegangan dinamis pada freespan terdiri atas 2 jenis tegangan dinamis yaitu pada saat kondisi *in-line flow* dan pada saat *cross flow* (DNV RP F-105). Tegangan dinamis dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_E^{IL} = \frac{1}{2} S_{comb,IL} \quad (2.56)$$

$$\sigma_E^{CF} = \frac{1}{2} S_{combCF} \quad (2.57)$$

Dengan,

S_{IL} = In-Line stress range

$$S_{IL} = 2A_{IL} \cdot \left(\frac{A_y}{D}\right) \cdot \Psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_s \quad (2.58)$$

S_{CF} = Cross Flow stress range

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot \left(\frac{A_z}{D_{tot}}\right) R_k \cdot \gamma_s \quad (2.59)$$

A_{IL} = Amplitudo defleksi tegangan *in-line* yang diakibatkan VIV

A_{CF} = Amplitudo defleksi tegangan *cross flow* yang diakibatkan VIV

$$A_{IL/CF,1}^{\max} = 2C_4(1 + CSF) \frac{DEr}{L_{eff}^2} \quad (2.60)$$

$\Psi_{\alpha,IL}$ = Faktor koreksi untuk rasio aliran arus α

$$\Psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{for } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5)/0.3 & \text{for } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1.0 & \text{for } \alpha > 0.8 \end{cases} \quad (2.61)$$

γ_s = Safety Factor untuk tiap stress range

$\frac{A_y}{D}$ = Amplitudo respon *in-line* VIV

$\frac{A_z}{D}$ = Amplitudo respon *cross flow* VIV

2.2.15 Kriteria Screening

Setelah semua variabel telah didapatkan, frekuensi natural pipa bisa didapatkan. Langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah screening hasil dari frekuensi natural pipa tersebut pada arah *inline* maupun *crossflow* sesuai dengan standar DNV RP F105. Jika screening kriteria ini tidak terpenuhi, maka terjadi VIV (*Vortex Induced Vibration*). Untuk natural frekuensi arah *inline*, harus memenuhi kriteria sebagai berikut :

$$f_{IL,1} > \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,IL}}{V_{R,onset}^{IL} D} \quad (2.62)$$

$$f_{CF,1} > \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,CF}}{2D} \quad (2.63)$$

Dengan,

$V_{R,onset}^{IL}$ = Onset inline untuk reduced velocity

$\gamma_{f,IL}$ = Safety factor pada onset inline

γ_{CF} = Screening factor untuk cross flow

U_{extreme} = Kondisi gelombang ekstrim

Untuk menghitung U_{extreme} Dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$U_{\text{extreme}} = \max(U_{c,10\text{-year}} + U_{w,1\text{-year}}, U_{c,1\text{-year}} + U_{w,10\text{-year}}) \quad (2.64)$$

Menurut Guo dkk, untuk *screening* kriteria *free span* dapat digunakan persamaa-persamaan sebagai berikut:

Tabel 2.6 Faktor Melakukan Mitigasi pada Span Kritis

Faktor	Keterangan
$F_s > 0.7 F_n$	Apabila frekuensi <i>vortex shedding</i> lebih besar dari 0.7 kalinya frekuensi natural pipa sehingga osilasi terjadi.
$L > L_{\text{max}}$	Apabila panjang span aktual melebihi panjang span maksimum.
Beban pada pipeline $> P_{cr}$	Apabila beban pada pipa arah horizontal melebihi $P_{cr \text{ inline}}$ dan beban pada pipa arah vertikal melebihi $P_{cr \text{ crossflow}}$.
Defleksi $> 10D$	Apabila defleksi yang terjadi di arah <i>inline</i> dan <i>crossflow</i> melebihi 10 kalinya diameter luar pipa.
<i>Gap</i> pipa dengan tanah $> 5D$	Apabila jarak pipa dengan tanah (<i>Gap</i>) melebihi 5 kali diameter luar pipa.

Dari kriteria-kriteria di atas dapat mengetahui titik span yang mengalami kondisi kritis jika tidak memenuhi kriteria tersebut dan membutuhkan mitigasi.

2.2.16 Simulasi Menggunakan ANSYS Fluent

ANSYS Fluent adalah salah satu software CFD (Computational Fluid Dynamics) dari ANSYS. Pada studi ini, digunakan untuk melakukan simulasi pada *vortex* yang terjadi di belakang pipa akibat arus.

2.2.17 Allowable Span Length (Panjang Span Maksimum)

Panjang *span* maksimum pada kondisi *in-line* dan *cross-flow*. Dapat dihitung, perbedaan yang menjadi dasar kedua panjang span tersebut adalah pada frekuensi *natural* dan *reduced velocity*. Berdasarkan Guo dkk.(2005), untuk panjang *span* maksimum pada kondisi *in-line* dapat ditentukan dengan persamaan seperti di bawah ini :

$$L_c = \sqrt{\frac{C_e f_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{M_e}}} \quad (2.65)$$

dengan,

L_c = panjang kritis *free span* (m)

f_n = frekuensi *natural* (Hz)

E_{pipa} = Modulus Young pipa (N/m²)

I_{pipa} = Momen Inersia pipa (m⁴)

M_e = Massa efektif pipa dalam air (Kg/m)

Sedangkan untuk menentukan panjang kritis pada kondisi *cross-flow*, dapat menggunakan persamaan :

$$L_c = \sqrt{\frac{C_e U_r D}{2\pi U_c} \sqrt{\frac{EI}{M_e}}} \quad (2.66)$$

dengan,

L_c = Panjang kritis *free span* (m)

f_n = Reduced velocity

E_{pipa} = Modulus Young pipa (N/m²)

D = Diameter luar pipa (m)

I_{pipa} = Momen inersia pipa (m^4)

M_e = Massa efektif pipa dalam air (Kg/m)

U_C = Kecepatan arus efektif (m/sec)

2.2.18 Analisa Keandalan dalam Perancangan

Dalam konsep keandalan, suatu masalah akan didefinisikan dalam hubungan permintaan dan penyediaan, yang keduanya merupakan variabel-variabel acak. Peluang terjadinya kegagalan suatu rancangan, dimana penyediaan (ketahanan atau kekuatan sistem) tidak dapat memenuhi permintaan (beban yang bekerja pada sistem). Kecenderungan ini salah satunya dikarenakan adanya kerusakan yang terjadi pada sistem rekayasa yang disebabkan oleh intraksi panas, beban statis maupun beban dinamis dapat dijelaskan secara lebih baik dengan konsep ini.

Dalam konsep ini perancang dapat menggambarkan suatu sistem dengan segala hal yang mempengaruhi atau mengakibatkan kerusakan pada sistem tersebut misalnya kondisi pembebanan, ketahanan struktur, kondisi lingkungan yang lebih mendekati keadaan yang sebenarnya karena melibatkan aspek ketidakpastian dalam analisisnya. Dalam analisa keandalan sistem struktural maka perlu untuk mendefinisikan ketidakpastian yang diterima oleh struktur membagi ketidakpastian dalam 3 kelompok yaitu:

1. Ketidakpastian fisik, adalah ketidakpastian yang berhubungan dengan keragaman (*variability*) fisik seperti : beban, sifat material, dan ukuran material. Keragaman fisik ini hanya bisa dinyatakan dalam data sampel, dengan pertimbangan praktis dan ekonomis.

2. Ketidakpastian statistical, adalah ketidakpastian yang berhubungan dengan data yang dibuat untuk membuat model secara probabilistik dari berbagai macam keragaman fisik diatas.

3. Ketidakpastian model, yaitu ketidakpastian yang berhubungan dengan tanggapan dari jenis struktur yang dimodelkan secara matematis dalam bentuk deterministic atau probabilistik. Ketidakpastian yang terjadi disini merupakan hasil dari penyederhanaan dengan memakai bermacam-

macam asumsi, kondisi batas yang tidak diketahui, dan sebagai hasil dari pengaruh interaksi ketidakpastian yang tidak tercakup dalam model.

Dalam perancangan struktur bangunan lepas pantai akan banyak dijumpai ketidakpastian yang mempengaruhi sistem bangunan diantaranya :

1. Ketidakpastian pada beban yang disebabkan gelombang laut yang selalu berubah-ubah.
2. Ketidakpastian pada sifat material seperti tegangan luluh (*yield strength*). Kekuatan lelah (*fatigue strength*), Ketidakpastian dalam menganalisa bangunan yaitu dalam analisa respon atau analisa keadaan batas. Dalam analisa tersebut pasti akan melibatkan beberapa asumsi, pendekatan ataupun idealisasi model matematis dari lingkungan fisik dan tanggapan bangunan terhadap lingkungan tersebut. Adanya beberapa keragaman pada kualitas bangunan yang berhubungan dengan pengawasan pekerjaan di lapangan seperti operasi pengangkatan pipa, penggantian pipa, dan sebagainya yang disebabkan oleh kesalahan manusia. Faktor ini mempunyai pengaruh yang sangat penting pada kekuatan bangunan.

2.2.19 Jenis-Jenis Metode Analisa Keandalan

2.2.19.1 Metode Analisa Keandalan Level – 1

Dalam metode ini tingkat keandalan struktur dinyatakan berdasarkan pada struktur elemen dasar dengan menggunakan faktor keamanan parsial atau koefisien parsial, yang berhubungan dengan karakteristik awal dari perubahan beban dan struktur utama. Metode level – 0 ini pada dasarnya bukan merupakan metode analisa keandalan, tetapi metode untuk perancangan atau pemeriksaan keamanan struktur.

2.2.19.2 Metode Analisa Keandalan Level – 2

Metode ini menggunakan prosedur pendekatan iterasi untuk memperkirakan probabilitas kegagalan dari suatu struktur atau sub-struktur. Biasanya memerlukan idealisasi jenis keruntuhan dan dilakukan dengan menyederhanakan perubahan-

perubah distribusi probabilitas gabungan. Metode ini memiliki sebuah titik tunggal sebagai pengecekan pada bidang kegagalan (*failure surface*). Bidang kegagalan adalah sekumpulan perubah dasar $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ yang bisa didefinisikan dan dinyatakan dalam perubah dasar n dimensi ω (*n-dimensional basic variabel space* ω). Bidang kegagalan adalah bidang yang membagi ruang perubah acak menjadi 2 daerah yaitu sebuah daerah kegagalan (*failure region* ω_f) dan sebuah daerah aman (*safe region* ω_s). Bidang kegagalan secara matematis bisa dinyatakan dengan persamaan bentuk :

$$f(X) = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (2.67)$$

dengan,

$f(X)$ = Fungsi kegagalan

Harga positif dari persamaan diatas menunjukkan sejumlah perubah dasar yang aman (daerah aman) dan harga yang tidak positif menunjukkan himpunan perubah pada daerah yang tidak aman (daerah kegagalan).

2.2.20 Keandalan pada Sistem Rekayasa

Sistem dari keandalan pada dasarnya dapat ditunjukkan sebagai problematika antara *Demand* (tuntutan atau beban) dan *Capacity* (kapasitas atau kekuatan). Secara tradisional didasarkan atas *safety factor* (angka keamanan) yang diperkenankan. Ukuran konvensional untuk angka keamanan adalah perbandingan antara asumsi nominal kapasitas, X^* , dan beban, Y^* , yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{X^*}{Y^*} \quad (2.68)$$

Dengan :

Z^* = Angka Keamanan

X^* = Nominal Kapasit

2.2.21 Simulasi Monte Carlo

Menurut (Rosyid, 2007) suatu sistem rekayasa dapat dipelajari dengan membuat serangkaian percobaan secara fisik menggunakan model yang merefleksikan karakter-karakter pokok dari system itu. Percobaan pada model menggunakan simulai kenyataan riil dengan cara mereproduksi prototype kenyataan tersebut. Simulasi monte carlo digunakan untuk memecahkan masalah yang mengandung variable atau parameter yang memiliki *random number* atau mengandung perubah acak. Pada simulasi Monte Carlo adalah variabel-variabel dari suatu sistem yang disimulasikan berdasarkan distribusi peluangnya, contohnya berdasarkan fungsi kerapatan peluang tiap-tiap variabel tersebut. Agar diperoleh sekumpulan dari respons atau kinerja sistem tersebut. Simulasi Monte Carlo mensyaratkan bahwa distribusi peluang dari perubah acak yang terlibat di dalam sistem yang telah dipelajari dapat di asumsikan.

$$FK(x) < 0 \quad (2.69)$$

dengan,

$FK(x)$ = Fungsi Kinerja

Jika, fungsi kinerja dibawah 0 maka system kinerja di anggap gagal dengan jumlah n kali. Sehingga peluang kegagalan yang ditinjau adalah rasio antara jumlah kejadian kegagalan dengan jumlah sampel, didapatkan persamaan sebagi berikut (Rosyid, 2007):

$$P_g = \frac{n}{N} \quad (2.70)$$

dengan,

P_g = Peluang Kegagalan

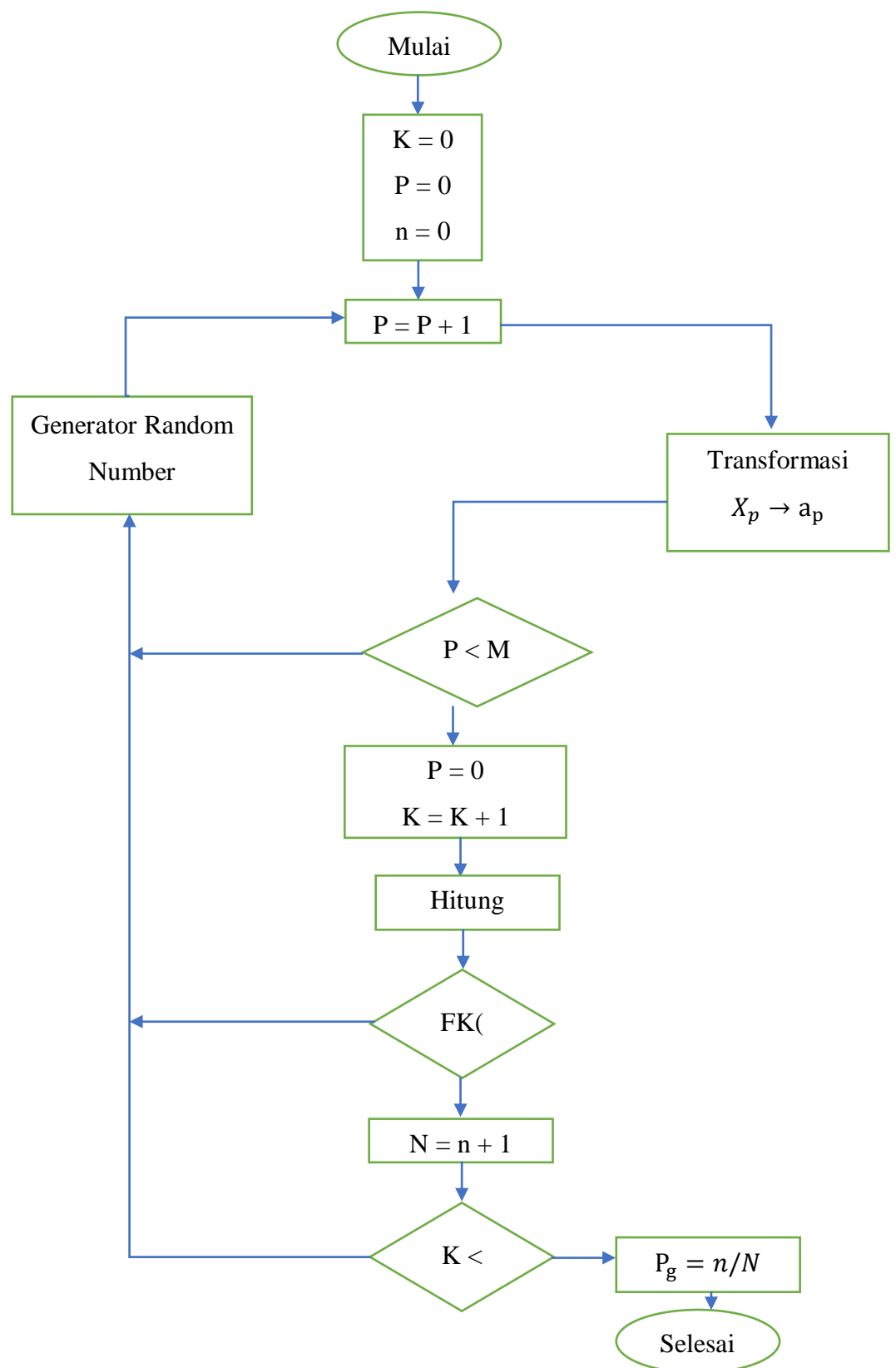
n = Jumlah kejadian gagal

N = Jumlah sampel

Langkah-langkah dalam perhitungan keandalan struktur menggunakan simulasi *Monte Carlo*:

1. Membuat distribusi probabilitas beberapa variabel
Menentukan probabilitas untuk setiap variabel yang ditentukan dengan membagi frekuensi percobaan dengan jumlah total percobaan
2. Membuat distribusi probabilitas kumulatif untuk tiap variabel
Konversi jumlah distribusi probabilitas dengan menjumlahkan tiap angka probabilitas dengan jumlah sebelumnya.
3. Menentukan range angka random untuk tiap variabel acak
Setelah menentukan probabilitas kumulatif tiap variabel yang digunakan dalam simulasi, menentukan batas range yang mewakili tiap kemungkinan hasil, untuk digunakan pada interval angka random.
4. Membuat angka random
Membuat angka random dengan Microsoft Excel menggunakan formula =RAND() dengan jumlah sesuai percobaan.
5. Membuat simulasi dari percobaan-percobaan.
Membuat hasil simulasi dari variabel-variabel acak tersebut.

Dalam berbentuk grafik langkah-langkah simulasi Monte Carlo dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2.7 Diagram Alir Keandalan dengan Simulasi *Monte Carlo*

(Sumber: Rosyid, Daniel. 2007)

2.2.21 Moda Kegagalan

Kegagalan terjadi ketika screening kriteria ini tidak terpenuhi, maka terjadi VIV (Vortex Induced Vibration). Untuk natural frekuensi arah *inline* dan *crossflow*, harus memenuhi kriteria sebagai berikut :

$$\begin{aligned} f_{IL,1} &> \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,IL}}{V_{R,\text{onset}}^{IL} D} \\ f_{CF,1} &> \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,CF}}{2D} \end{aligned} \quad (2.64)$$

Dengan,

$V_{R,\text{onset}}^{IL}$ = Onset *inline* untuk *reduced velocity*

$\gamma_{f,IL}$ = Safety factor pada onset *inline*

γ_{CF} = Screening factor untuk *cross flow*

U_{extreme} = Kondisi gelombang ekstrim

Untuk menghitung U_{extreme} Dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$U_{\text{extreme}} = \max(U_{c,10\text{-year}} + U_{w,1\text{-year}}, U_{c,1\text{-year}} + U_{w,10\text{-year}}) \quad (2.65)$$

$$P_f = P(f_{IL,1} < \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,IL}}{V_{R,\text{onset}}^{IL} D}) \quad (2.66)$$

Moda kegagalan VIV diformulasikan sebagai berikut :

$$MK_f = f_{IL,1} - \frac{U_{\text{extreme}} \gamma_{f,IL}}{V_{R,\text{onset}}^{IL} D} \quad (2.67)$$

dengan :

MK_f = Moda kegagalan *freespan*

2.2.22 Mitigasi

Pada pipa bawah laut yang mengalami free span dan pada kondisi kritis memerlukan adanya mitigasi. Mitigasi berfungsi agar mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan pada pipa yang mengalami span. Mitigasi yang biasa

dilakukan pada kondisi pipa yang mengalami *free span* adalah penambahan *support*. Penambahan *support* berfungsi untuk mengurangi panjang *free span* agar mengurangi getaran akibat *vortex* yang terjadi.

Beberapa cara mitigasi untuk *free span* pada pipa bawah laut sebagai berikut:

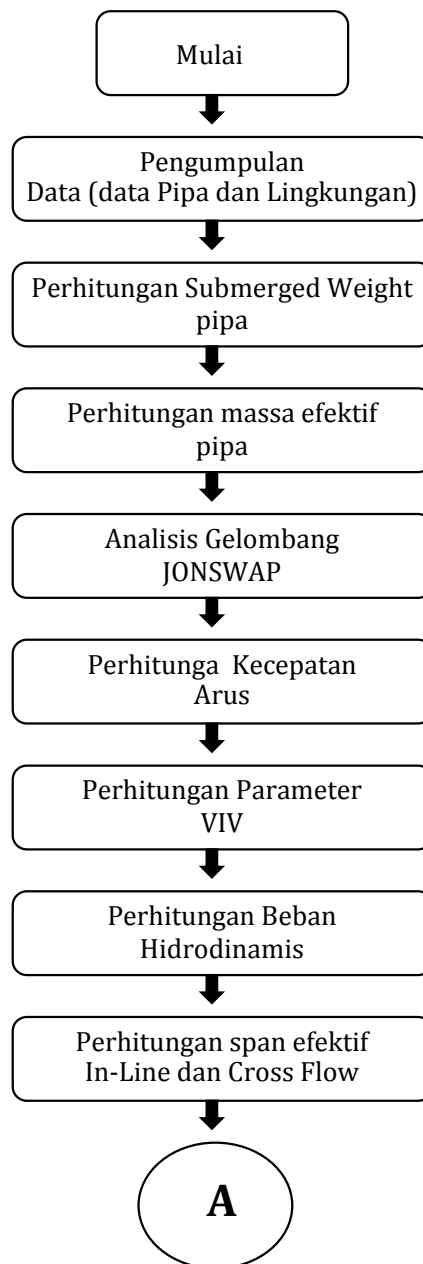
1. *Sand-Cement Bags* atau *Concrete Mattresses*, penempatan *sand bags* atau *concrete mattress* di bawah pipa yang mengalami bentang bebas.
2. *Clamp on support with telescoping legs*, penambahan tumpuan berupa *telescoping legs*.
3. *Alteration of seabed terrain*, metode ini dilakukan dengan cara memperhalus profil dasar laut sehingga panjang bentang bebas dapat diminimalisir.
4. *Buoyancy modules*
5. *Rock damping*, penambahan tumpuan pada daerah yang mengalami bentang bebas berbentuk tumpukan batu.
6. *Grout bag*, tumpuan ini berupa bantalan yang diinjeksi dengan beton sebagai isinya.
7. *VIV Suppresion*, penambahan *helical strake* yang dapat mencegah *vortex shedding*.

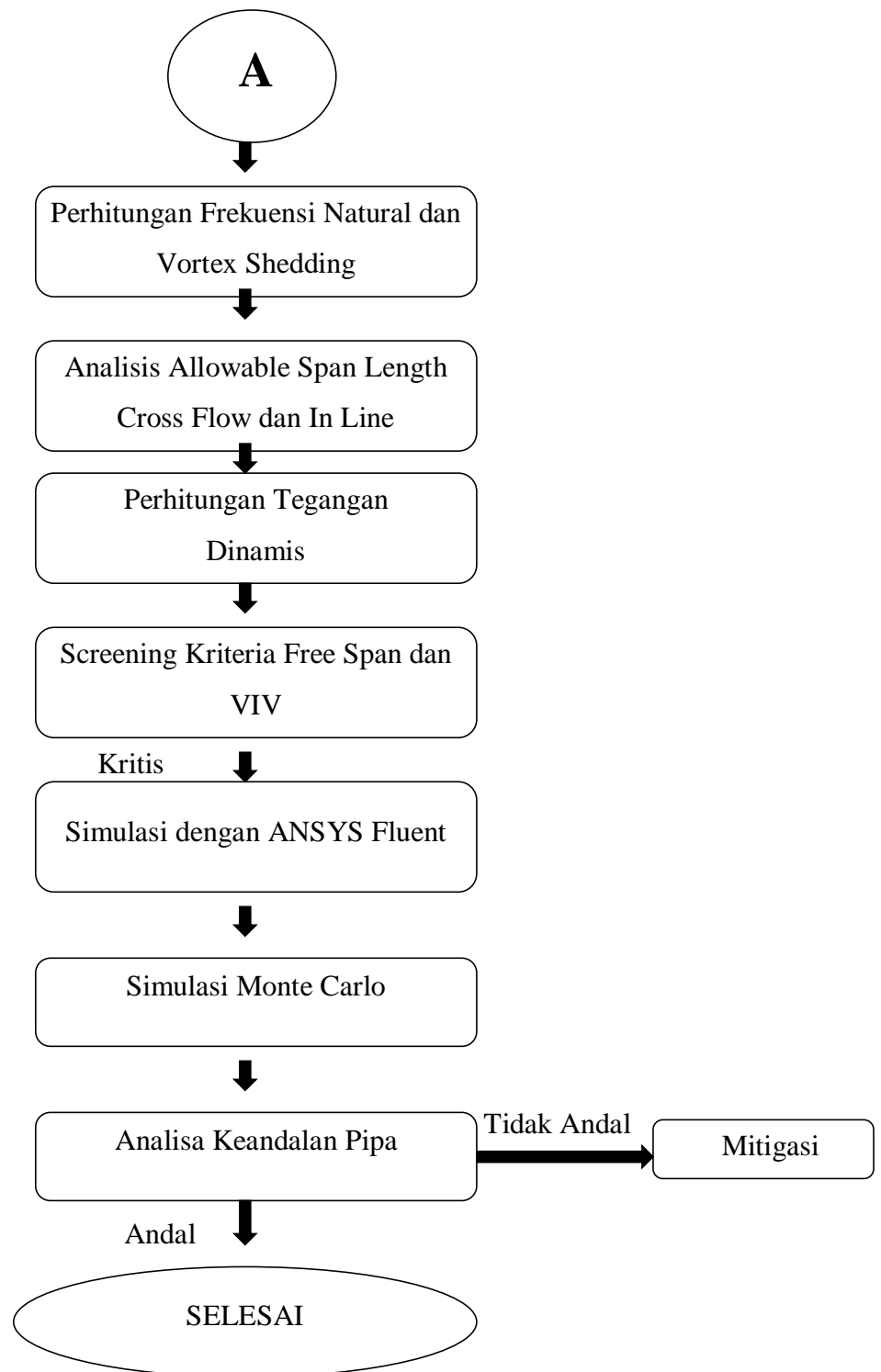
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian dari pengerjaan Tugas Akhir ini disajikan dalam diagram alir di bawah ini:





3.2 Prosedur Penelitian

Dalam penyusunan tugas akhir ini memiliki beberapa langkah-langkah secara berurutan dalam pengerjaannya. Berikut penjelasan dari diagram alir kegiatan penyelesaian tugas akhir ini:

1. Pengumpulan data:

Data yang akan digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini adalah data pipa yang berupa data properties pipa dan data lingkungan di Selat Madura milik PT. X

2. Perhitungan *Submerged Weight* Pipa:

Perhitungan *Submerged Weight* Pipa ini diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri.

3. Perhitungan massa efektif pipa:

Massa efektif pipa merupakan fungsi dari frekuensi natural pipa, sehingga dibutuhkan dalam perhitungan panjang span.

4. Analisis Gelombang JONSWAP

Menghitung kecepatan gelombang yang mengakibatkan kondisi aliran berosilasi dengan menggunakan teori numerik atau analisi spektra gelombang JONSWAP.

5. Perhitungan Kecepatan Arus Efektif

Perhitungan kecepatan efektif yang bekerja pada pipa merupakan kombinasi dari kecepatan arus dan kecepatan gelombang.

6. Perhitungan parameter-parameter *Vortex Induced Vibration* (VIV)

Perhitungan parameter-parameter untuk menentukan *Vortex Induced Vibration* (VIV)

7. Perhitungan beban hidrodinamis

Perhitungan beban yang terjadi pada pipa akibat gesekan fluida di sekitar pipa, yaitu gaya *drag* dan gaya lift.

8. Perhitungan Panjang Span efektif

Perhitungan panjang span memperhitungkan panjang efektif dari panjang span aktual yang dipengaruhi juga oleh *gap*.

9. Perhitungan Frekuensi Natural dan *Vortex Shedding*

Perhitungan frekuensi natural sebagai respon dinamik pipa akibat beban gelombang dan arus. *Vortex Shedding* adalah aliran *vortex* yang terjadi di belakang pipa.

10. Panjang *Allowable Span* (Panjang Span Kritis)

Panjang *span* maksimal yang diijinkan terjadi pada pipa baik untuk kondisi osilasi *in-line* dan osilasi *cross flow*.

11. Perhitungan Tegangan Dinamis

Perhitungan tegangan dinamis yang diakibatkan oleh beban lingkungan terhadap pipa.

12. Screening VIV (DNV RP F105)

Screening kriteria berdasarkan DNV RP F105 untuk mengetahui apakah terjadi VIV pada titik span tersebut.

13. Screening Kriteria *Free Span*

Screening kriteria akibat *free span* untuk mengetahui apakah pipa dalam kondisi kritis atau tidak.

14. Simulasi menggunakan ANSYS Fluent

Analisa sistem yang melibatkan aliran fluida dengan menggunakan simulasi berbasis komputer. Sehingga, didapatkan aliran yang terjadi di sekitar pipa yang mengalami *span*.

15. Simulasi Monte Carlo

Perhitungan peluang kegagalan dan keandalan pada pipa dengan simulasi Monte Carlo menggunakan *Random Number Generator* (RNG)

16. Mitigasi

Jika, setelah analisis keandalan pipa tidak andal terhadap VIV maka diperlukan adanya mitigasi.

17. Selesai

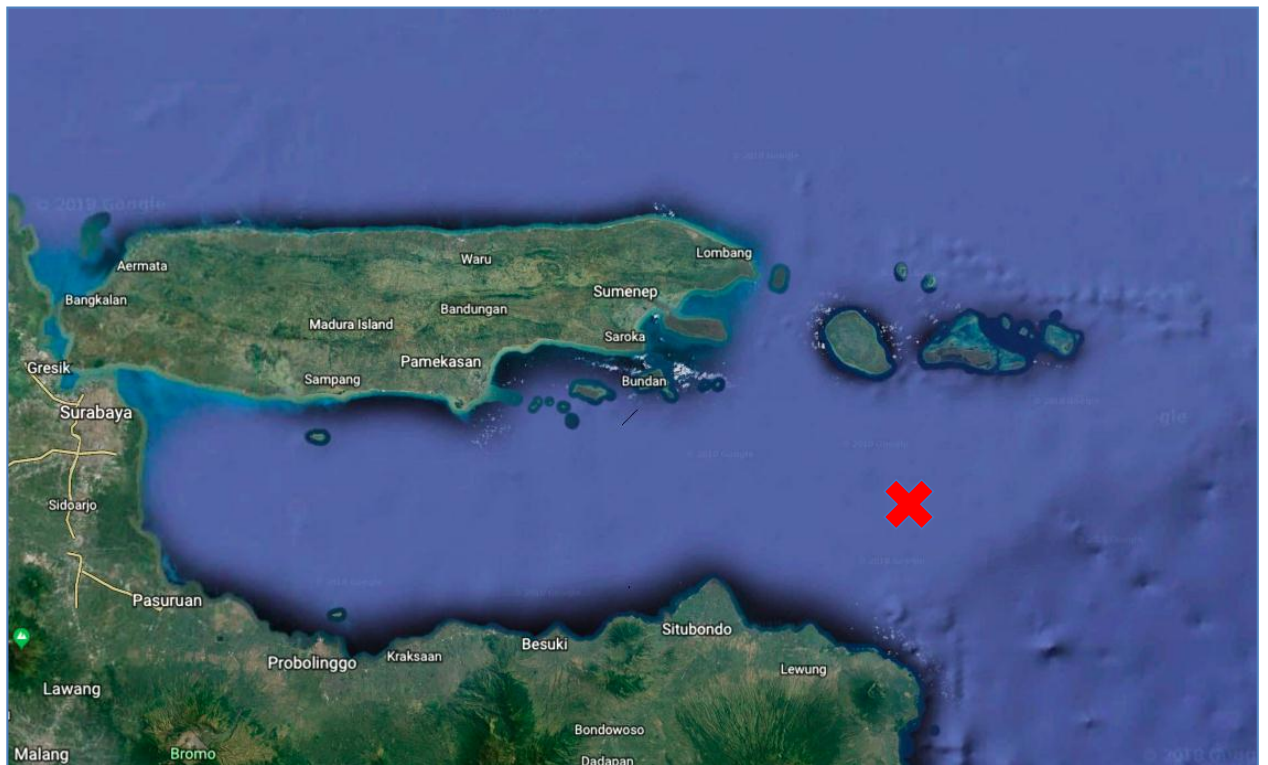
BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

Analisa perhitungan pipa yang mengalami VIV (*Vortex Induced Vibration*) akibat *Free Span* membutuhkan data-data pipa berupa data umum desain pipa dan data lingkungan. Pada tugas akhir ini, data pipa yang digunakan adalah milik PT. X yang menghubungkan *platform A* ke platform B berlokasi pada Selat Madura, Jawa Timur. Pipa milik PT. X sepanjang 27 km. Analisa VIV ini dilakukan dengan menggunakan hasil survey jalur pada pipa milik

Platform PT. X



PT.X.

Gambar 4.1 Peta Lokasi *Platform* Milik PT. X

4.1.1 Data Pipa

Data-data material dan dimensi pipa gas milik PT. X, sebagai berikut:

Tabel 4.1 Data Dimensi Pipa

Description	Unit	Value
<i>Density</i>	<i>kg/m³</i>	7850
<i>Modulus of Elasticity</i>	<i>MPa</i>	207000
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,3
<i>Outside Diameter</i>	<i>mm</i>	508
<i>Inside Diameter</i>	<i>mm</i>	476,2
<i>Wall Thickness</i>	<i>mm</i>	15,9
<i>Density of Concrete</i>	<i>kg/m³</i>	3044
<i>Concrete Coating</i>	<i>mm</i>	40
<i>Anti-Corrosion Coating Thickness</i>	<i>mm</i>	5,5
<i>Anti-Corrosion Coating Density</i>	<i>kg/m³</i>	1280
SMYS	<i>MPa</i>	450
SMTS	<i>MPa</i>	535

4.1.2 Data Lingkungan

Tabel 4.2 Data Lingkungan Pipa

Parameter	Unit	Value
Tinggi Gelombang Signifikan (10 Tahun)	<i>m</i>	3,90
Periode Gelombang	<i>s</i>	8,05
Tinggi Gelombang Max	<i>m</i>	7,80
Periode Gelombang Max	<i>s</i>	7,24
Kedalaman Max	<i>m</i>	106,50
Kedalaman Min	<i>m</i>	79,30
Tinggi Gelombang Signifikan (100 Tahun)	<i>m</i>	5,09
Periode Gelombang	<i>s</i>	8,87
Tinggi Gelombang Max	<i>m</i>	10,00
Periode Gelombang Max	<i>s</i>	7,93

Arus 1 m dari Seabed (10 Tahun)	m/s	0,618
Arus 1 m dari Seabed (100 Tahun)	m/s	0,694

Data lingkungan diperlukan untuk Analisa VIV akibat *Free span* ini, yang digunakan untuk mendukung analisa struktur pipa akibat beban lingkungan yang terjadi disekitar pipa tersebut. Data lingkungan yang terjadi di sekitar pipa ini, sebagai berikut:

4.1.3 Data Survey Free Span

Hasil *post-lay survey* pipa bawah laut milik PT.X yang mengalami *free span*, berikut hasil survey pada KP 0- KP 1.3.

Tabel 4.3 Data *Post-Lay Survey*

No.	KP (km)	Gap (m)	Length (m)
1	0,176-0,199	0,2	22,1
2	0,221-0,233	0,9	11,1
3	0,248-0,274	1,7	24,4
4	0,298-0,326	1,4	25,2
5	0,441-0,464	0,8	19,8
6	0,493-0,515	2	20,8
7	0,560-0,615	2,9	49,9
8	0,634-0,679	2,5	42,9
9	0,715-0,750	0,4	33,9
10	0,762-0,789	1,8	25,8
11	0,825-0,862	0,9	34,8
12	0,935-0,969	0,7	31,8
13	0,982-0,998	0,2	14,7
14	1,087-1,106	0,4	18,5
15	1,257-1,287	0,8	28,0

4.2 Pembahasan

4.2.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Pipa bawah laut memiliki beberapa lapisan yang memiliki kegunaannya masing-masing yaitu, pipa baja (*steel pipe*), lapisan anti-korosi (*anti-corrosion coating*), lapisan baja (*concrete coating*). Pada analisa VIV, dibutuhkan diameter total pipa sebagai parameter perhitungan. Maka, diperlukan perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.4 Dimensi Pipa

<i>Description</i>	Simbol	<i>Value</i>	Satuan
Tebal Dinding Pipa	t_2	0,0159	m
Diameter Total Pipa	D_t	0,5990	m
Diameter Dalam Pipa	D_i	0,4762	m
Diameter Luar Pipa	D	0,5080	m
Diameter Lapisan Anti Korosi	D_{cc}	0,5190	m
Diameter Lapisan <i>Concrete</i>	D_{conc}	0,5990	m
Luas Penampang <i>Internal</i> Pipa Baja	A_i	0,2528	m^2
Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	0,0291	m^2
Luas Penampang Lapisan Anti Korosi	A_{cc}	0,0104	m^2
Luas Penampang Lapisan <i>Concrete</i>	A_{conc}	0,0817	m^2
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,0007	m^4
Momen Inersia <i>Concrete</i>	I_{conc}	0,0015	m^4

Tabel di atas didapatkan hasil perhitungan diameter total pipa (D_{tot}) sebesar 0,599 m. Diameter total ini akan digunakan dalam perhitungan-perhitungan berikutnya.

4.2.2 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Analisa berat terendam pipa ini diperlukan untuk menghitung beban lateral yang terjadi akibat beban pipa tersebut. Hasil perhitungan berat pipa terendam pipa, sebagai berikut:

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa

<i>Description</i>	<i>Simbol</i>	<i>Value</i>	<i>Satuan</i>
Massa Konten Pipa	M_{fluida}	19,17	kg/m
Massa Pipa Baja	M_{st}	193,04	kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	M_{cc}	13,13	kg/m
Massa Lapisan Concrete	M_{conc}	213,91	kg/m
Massa Struktur Pipa	M_{str}	420,09	kg/m
Massa Bouyancy	F_b	288,96	N/m
Berat Terendam Pipa	W_{sub}	1285,00	N/m

4.2.3 Perhitungan Massa Efektif

Massa efektif adalah jumlah total dari massa pipa termasuk lapisan-lapisannya, massa fluida di dalam pipa, dan massa tambah. Massa tambah adalah massa air laut yang mengalami dipindahkan (*displacement*) dengan cara mengalikan massa *buoyancy* dan koefisien tambah. Massa efektif pipa dipengaruhi oleh massa jenis lapisan pipa dan massa tiap lapisan tersebut.. Hasil perhitungan massa efektif, sebagai berikut:

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Massa Efektif Pipa

No.	Panjang Span (m)	Gap (m)	Massa Tambah (kg/m)	Massa Efektif (kg/m)
1	22,15	0,2	369,692	808,95
2	11,06	0,9	288,963	728,22
3	24,39	1,7	288,963	728,22
4	25,17	1,4	288,963	728,22
5	19,78	0,8	288,963	728,22
6	20,81	2	288,963	728,22
7	49,90	2,9	288,963	728,22
8	42,90	2,5	288,963	728,22
9	33,94	0,4	303,052	742,31
10	25,84	1,8	288,963	728,22

No.	Panjang Span (m)	Gap (m)	Massa Tambah (kg/m)	Massa Efektif (kg/m)
11	34,78	0,9	288,963	728,22
12	31,76	0,7	288,963	728,22
13	14,73	0,2	369,692	808,95
14	18,51	0,4	303,052	742,31
15	28,04	0,8	288,963	728,22

4.2.4 Screening Response Model

Analisa untuk mengetahui tipikal karakteristik *Free Span* berdasarkan rasio perbandingan dari panjang *free span* dan diameter total pipa. Didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.7 Hasil *Screening Response Model*

No.	KP	Gap (m)	Length (m)	L/D	L/D>30
1	0,176-0,199	0,2	22,1	36,97	YES
2	0,221-0,233	0,9	11,1	18,47	NO
3	0,248-0,274	1,7	24,4	40,71	YES
4	0,298-0,326	1,4	25,2	42,02	YES
5	0,441-0,464	0,8	19,8	33,02	YES
6	0,493-0,515	2	20,8	34,74	YES
7	0,560-0,615	2,9	49,9	83,30	YES
8	0,634-0,679	2,5	42,9	71,63	YES
9	0,715-0,750	0,4	33,9	56,65	YES
10	0,762-0,789	1,8	25,8	43,14	YES
11	0,825-0,862	0,9	34,8	58,06	YES
12	0,935-0,969	0,7	31,8	53,02	YES
13	0,982-0,998	0,2	14,7	24,59	NO
14	1,087-1,106	0,4	18,5	30,91	YES
15	1,257-1,287	0,8	28,0	46,80	YES

Menurut DNV RP F-105 tahun 2017, tabel dibawah ini merupakan penjelasan karakteristik free span tersebut.

Table 1-1	
<i>L/D</i>	<i>Response description</i>
$L/D < 30$ ¹⁾	Very little dynamic amplification. Normally not required to perform comprehensive fatigue design check. Insignificant dynamic response from environmental loads expected and unlikely to experience VIV.
$30 < L/D < 100$	Response dominated by beam behaviour. Typical span length for operating conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions (and effective axial force).
$100 < L/D < 200$	Response dominated by combined beam and cable behaviour. Relevant for free spans at uneven seabed in temporary conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions, effective axial force (including initial deflection, geometric stiffness) and pipe “feed in”. Refer to 1.7 for free span response classification, which provides practical guidance for engineering applications, with respect to single and multi-mode response.
$L/D > 200$	Response dominated by cable behaviour. Relevant for small diameter pipes in temporary conditions. Natural frequencies governed by deflected shape and effective axial force.
1) For hot pipelines (response dominated by the effective axial force) or under extreme current conditions ($U_c > 1.0 - 2.0$ m/s) this L/D limit may be misleading.	

Gambar 4.2 Karakteristik Respon *Free Span*

(sumber: DNV RP F-105)

Berdasarkan tabel di atas, rasio L/D yang melebihi dari 30 merupakan tipikal kondisi span saat operasi yang memiliki natural frekuensi sensitif terhadap *boundary condition*, *effective axial force* termasuk *initial deflection* dan *geometric stiffness*. Dan L/D yang kurang dari 30 jarang mengalami VIV. Menurut hasil perhitungan di atas, dari 15 titik span pada pipeline milik PT. X ada 13 titik span yang melebihi 30 pada rasio L/D sehingga mungkin mengalami VIV.

4.2.5 Perhitungan Gelombang JONSWAP

Menurut DNV RP F109, untuk mencari *submerged weight requirement* dan transformasi kecepatan gelombang menjadi kecepatan partikel gelombang di sekitar dasar laut dapat menggunakan spektra JONSWAP.

Data lingkungan untuk kondisi operasi adalah kombinasi antara data gelombang 10 tahunan dan arus 100 tahunan. Untuk mencari spektral momen, berikut parameter-parameter yang diperlukan sebelum menghitung spectral momen:

Tabel 4.8 Parameter Perhitungan JONSWAP

Parameter	Notasi	Value (10 Tahun)	Value (100 Tahun)	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	3,9	5,09	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	8,05	8,87	s
Periode Gelombang Signifikan	ω_s	1,61	1,23	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9,8	9,8	m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	7,24	7,93	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0,87	0,79	rad/s
Fungsi Distribusi	ϕ	3,71	3,12	-
<i>Peakedness</i> Parameter	Y	4,39	5,00	-
Konstanta <i>Generalized Philips</i>	α	0,02	0,02	-
LN <i>Peakedness</i> Parameter	$LN(Y)$	1,48	1,61	-
Parameter Spektral	σ	0,09	0,09	-

Parameter yang telah didapatkan, digunakan untuk menghitung spectrum energi dengan menggunakan persamaan spektrum energi JONSWAP yang disajikan dalam berikut:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-0,5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right]}$$

4.2.5.1 Iterasi Spektrum (*Transfer Function G*)

Setelah mendapatkan spektra gelombang JONSWAP yang ditampilkan pada tabel di atas maka di dapatkan transformasi kecepatan gelombang menjadi kecepatan partikel gelombang disekitar dasar laut.

k yang akan digunakan untuk *transfer function G* didapatkan melalui iterasi persamaan berikut ini:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

$\tanh(k \cdot d)$ diasumsikan sama dengan 1 untuk menentukan k awal yang akan digunakan pada iterasi, sehingga:

$$k \text{ awal} = 0.0621$$

N Setelah iterasi maka diperoleh k sebesar 0.06211, selanjutnya k dimasukkan ke *transfer function G*.

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \text{dengan } \omega = 0 \text{ sampai dengan } 1$$

4.2.5.2 Suu (Spektrum Kecepatan Partikel)

Setelah spektrum energi dan *transfer function G* diperoleh, digunakan untuk mencari spektrum kecepatan partikel air di dasar laut akibat gelombang di permukaan laut menggunakan persamaan:

$$S_{uu}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

Hasil perhitungan analisis spektrum kecepatan partikel terdapat pada lampiran.

4.2.5.3 Momen Spektra Gelombang

1. Momen Spektra Gelombang (10 Tahun)

Perhitungan momen spektra digunakan untuk mencari kecepatan signifikan, periode gelombang, kecepatan dan periode saat kondisi ekstrem kecepatan partikel, dan kecepatan arus. Parameter lain Momen Spektra dari luasan di bawah kurva spektra:

$$M_0 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_0$$

$$M_0 = 1.9 \times 10^{-5}$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_1$$

$$M_1 = 2.2 \times 10^{-5}$$

$$M_2 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_2$$

$$M_2 = 2.6 \times 10^{-5}$$

$$M_4 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_4$$

$$M_4 = 4.8 \times 10^{-5}$$

a. Kecepatan Signifikan

Kemudian dapat diketahui kecepatan aliran gelombang signifikan dan *mean zero up crossing period* sama dengan:

$$U_s = 2 \sqrt{M_0}$$

$$U_s = 2 \sqrt{1.9} \times 10^{-5}$$

$$U_s = 0.06 \text{ m/s}$$

b. Periode Gelombang

Periode gelombang yang terjadi pada pipa:

$$T_u = 2 \pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

$$T_u = 2 \pi \sqrt{\frac{0.00022}{0.00026}}$$

$$T_u = 5.29 \text{ s}$$

c. *Reduction Factor*

$$R_d = 0.91$$

d. Kecepatan Partikel Gelombang

$$U_w = R_D \cdot U_{w\theta}$$

$$U_w = 0.06 \text{ m/s}$$

2. Momen Spektra Gelombang (10 Tahun)

Perhitungan momen spektra digunakan untuk mencari kecepatan signifikan, periode gelombang, kecepatan dan periode saat kondisi ekstrem kecepatan partikel,

dan kecepatan arus. Parameter lain Momen Spektra dari luasan di bawah kurva Spektra:

$$M_0 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_0$$

$$M_0 = 3.3 \times 10^{-5}$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_1$$

$$M_1 = 4.8 \times 10^{-5}$$

$$M_2 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_2$$

$$M_2 = 7.0 \times 10^{-5}$$

$$M_4 = \frac{1}{3} \cdot \Delta \omega \cdot \Sigma m_4$$

$$M_4 = 2.0 \times 10^{-4}$$

a. Kecepatan Signifikan

Kemudian dapat diketahui kecepatan aliran gelombang signifikan dan *mean zero up crossing period* di dasar laut menggunakan persamaan 3.42 dan 3.43 sebesar:

$$U_s = 2 \sqrt{M_0}$$

$$U_s = 2 \sqrt{3.4} \times 10^{-5}$$

$$U_s = 0.09 \text{ m/s}$$

b. Periode Gelombang

Periode gelombang yang terjadi pada pipa:

$$T_u = 2 \pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

$$T_u = 2 \pi \sqrt{\frac{0.00039}{0.00070}}$$

$$T_u = 4.36 \text{ s}$$

c. Reduction Factor

$$R_d = 0.87$$

d. Kecepatan Partikel Gelombang

$$U_w = R_D \cdot U_{w0}$$

$$U_w = 0.08 \text{ m/s}$$

4.2.6 Perhitungan Kecepatan Arus Efektif

Analisa gelombang pada tugas akhir ini menggunakan metode JONSWAP untuk menghitung kecepatan gelombang. *Wave-Induced Oscillatory Flow* kondisi pada level *free span* dapat dihitung menggunakan numerikal atau analitikal teori gelombang. Pada kebanyakan kasus, teori gelombang linear dapat digunakan (DNV RP F-105, 2017). JONSWAP dapat digunakan untuk mentransformasi kecepatan gelombang menjadi kecepatan partikel gelombang. Hasil perhitungan dari metode JONSWAP adalah sebagai berikut:

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Kecepatan Arus Total

Panjang Span	Uc (10 Tahun)	Uc (100 Tahun)	Uw (10 Tahun)	Uw (100 Tahun)	Ue (10 Tahun)	Ue (100 Tahun)
22,147	0,607	0,910	0,001	0,002	0,608	0,912
11,063	0,653	0,868	0,001	0,002	0,654	0,870
24,387	0,680	0,916	0,001	0,002	0,681	0,918
25,171	0,672	0,918	0,001	0,002	0,673	0,920
19,781	0,648	0,903	0,001	0,002	0,650	0,906
20,811	0,688	0,907	0,001	0,002	0,689	0,909
49,897	0,705	0,961	0,001	0,002	0,706	0,963
42,905	0,698	0,951	0,001	0,002	0,699	0,953
33,935	0,625	0,937	0,001	0,002	0,626	0,939
25,842	0,683	0,920	0,001	0,002	0,684	0,922
34,779	0,653	0,938	0,001	0,002	0,654	0,940
31,762	0,643	0,933	0,001	0,002	0,645	0,935
14,728	0,607	0,885	0,001	0,002	0,608	0,887
18,513	0,625	0,899	0,001	0,002	0,626	0,901
28,035	0,648	0,925	0,001	0,002	0,650	0,927

Untuk perhitungan-perhitungan selanjutnya, digunakan kecepatan arus total yang merupakan kecepatan efektif partikel.

4.2.7 Perhitungan Parameter VIV

Parameter-parameter yang digunakan untuk analisis VIV terdiri dari *Reynolds Number*, Stabilitas Parameter, *Reduced Velocity*, dan *Keulegan-Carpenter*. Untuk menghitung parameter-parameter tersebut, diperlukan beberapa parameter yaitu sebagai berikut:

Tabel 4.10 Parameter Perhitungan VIV

Parameter	Notasi	Value	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1024,5	kg/m ³
<i>Stability Parameter Safety Factor</i>	λ_k	1,150	-
<i>Soil Damping</i>	ζ_{soil}	0,010	-
<i>Hydrodynamic Damping</i>	ζ_h	0,000	-
<i>Structural Damping</i>	ζ_{str}	0,005	-
Kekasaran Permukaan Pipa	K	0,003	m
Diameter Total Pipa	D_I	0,599	m
Rasio k/Di	K/DI	0,005	-
Frek. Gelombang Signifikan (10 Tahun)	ω_s	1,610	rad/s
Frek. Gelombang Signifikan (100 Tahun)	ω_s	1,234	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	V_k	0,000	m ² /s

4.2.7.1 Perhitungan *Reynold Number*

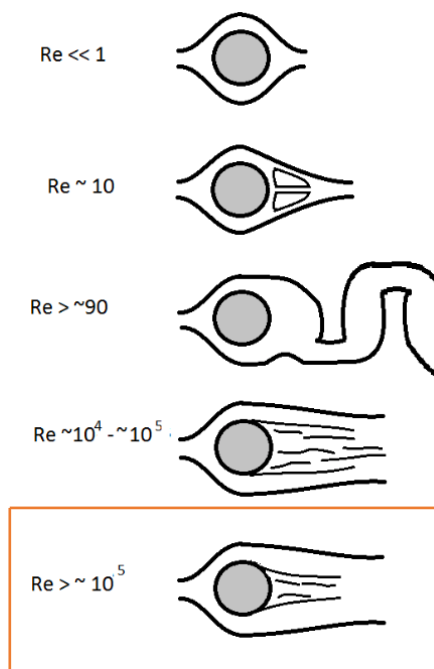
Parameter pertama untuk analisa panjang *free span* dinamis adalah *Reynold Number*. *Reynold Number* adalah rasio antara *inertia force* dan *viscous force*. Perhitungan *Reynold Number* menggunakan persamaan (2.39). Hasil perhitungan dari persamaan tersebut didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan *Reynolds Number*

L (m)	e (m)	Re (10 Tahun)	Re (100 Tahun)
22,15	0,20	349458,79	524370,81
11,06	0,90	376147,83	499959,70
24,39	1,70	391715,28	527781,55
25,17	1,40	386762,77	528902,45
19,78	0,80	373495,87	520375,80
20,81	2,00	395974,14	522169,45
49,90	2,90	406036,85	553228,26

L (m)	e (m)	Re (10 Tahun)	Re (100 Tahun)
42,90	2,50	401968,12	547849,00
33,94	0,40	359718,17	539505,24
25,84	1,80	393202,04	529834,01
34,78	0,90	376147,83	540378,73
31,76	0,70	370590,85	537153,31
14,73	0,20	349458,79	509982,16
18,51	0,40	359718,17	518036,74
28,04	0,80	373495,87	532722,92

Sehingga, dapat dilihat pada tabel di atas bahwa dari ke 15 titik span tersebut memiliki *Reynolds Number* $Re > 10^5$. Dan memiliki pola aliran seperti gambar berikut:



Gambar 4.3 *Qualitative Behaviours of Fluid Flow Over a Cylinder Depends to Reynolds Number*

(sumber: www.chegg.com)

Merupakan lapisan batas aliran laminar melalui perubahan aliran turbulen dan aliran gelombang lebih sempit dan tidak teratur.

4.2.7.2 Perhitungan Stabilitas Parameter

Parameter kedua yang dibutuhkan untuk analisa panjang free span dinamis adalah stabilitas parameter. Stabilitas parameter ini untuk menentukan respon maksimal akibat beban hidrodinamis. Hasil perhitungan stabilitas parameter diperoleh, sebagai berikut:

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Stabilitas Parameter

L (m)	e (m)	K_s	K_{sd}
22,15	0,20	0,330	0,29
11,06	0,90	0,297	0,26
24,39	1,70	0,297	0,26
25,17	1,40	0,297	0,26
19,78	0,80	0,297	0,26
20,81	2,00	0,297	0,26
49,90	2,90	0,297	0,26
42,90	2,50	0,297	0,26
33,94	0,40	0,302	0,26
25,84	1,80	0,297	0,26
34,78	0,90	0,297	0,26
31,76	0,70	0,297	0,26
14,73	0,20	0,330	0,29
18,51	0,40	0,302	0,26
28,04	0,80	0,297	0,26

4.2.7.3 Perhitungan *Reduced Velocity*

Parameter ketiga yang dibutuhkan untuk analisa panjang free span dinamis adalah *Reduced Velocity* yang dapat dicari menggunakan persamaan (2.40). Sedangkan untuk kondisi *Onset* (2.41) dan (2.46). Sehingga di dapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan *Reduced Velocity Cross-Flow* dan *In-Line*

L (m)	V_R CF Onset	V_R IL Onset	V_R
22,15	2,209	0,909	2,061
11,06	2,500	0,909	1,974
24,39	2,500	0,909	2,073
25,17	2,500	0,909	2,077
19,78	2,500	0,909	2,047
20,81	2,500	0,909	2,053
49,90	2,500	0,909	2,164
42,90	2,500	0,909	2,145
33,94	2,417	0,909	2,115
25,84	2,500	0,909	2,081
34,78	2,500	0,909	2,118
31,76	2,500	0,909	2,107
14,73	2,209	0,909	2,010
18,51	2,417	0,909	2,038
28,04	2,500	0,909	2,091

4.2.7.4 Perhitungan *Keulegan-Carpenter*

Keulegan-Carpenter merupakan parameter yang dapat menentukan perubahan aliran partikel air (laminar atau turbulen) pada silinder dibawah air. Parameter ini dapat dihitung menggunakan persamaan (2.38). Berikut hasil perhitungan *keulegan-carpenter*:

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Keulegan-Carpenter*

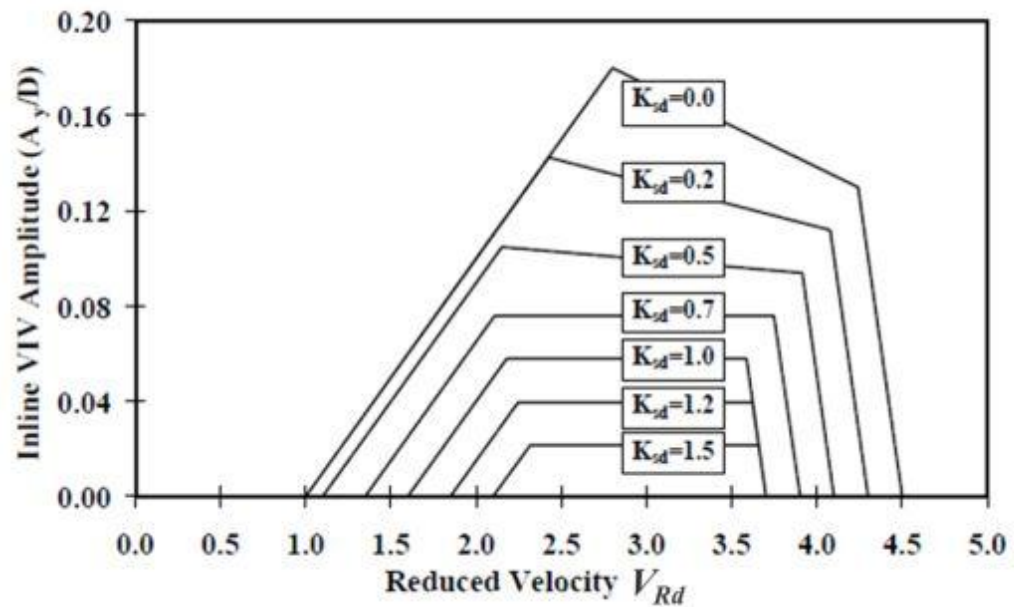
L (m)	Kc (10 Tahun)	Kc (100 Tahun)
22,15	5,36	6,63
11,06	5,77	6,32
24,39	6,01	6,67
25,17	5,94	6,69
19,78	5,73	6,58
20,81	6,08	6,60
49,90	6,23	6,99
42,90	6,17	6,93
33,94	5,52	6,82
25,84	6,04	6,70
34,78	5,77	6,83
31,76	5,69	6,79

L (m)	Kc (10 Tahun)	Kc (100 Tahun)
14,73	5,36	6,45
18,51	5,52	6,55
28,04	5,73	6,73

2.2.7.5 VIV Amplitude

Amplitudo maksimum VIV berupa respon amplitudo sebagai fungsi dari *reduced velocity* dan *stability parameter*. Dapat dicari menggunakan grafik sebagai berikut berdasarkan arah aliran:

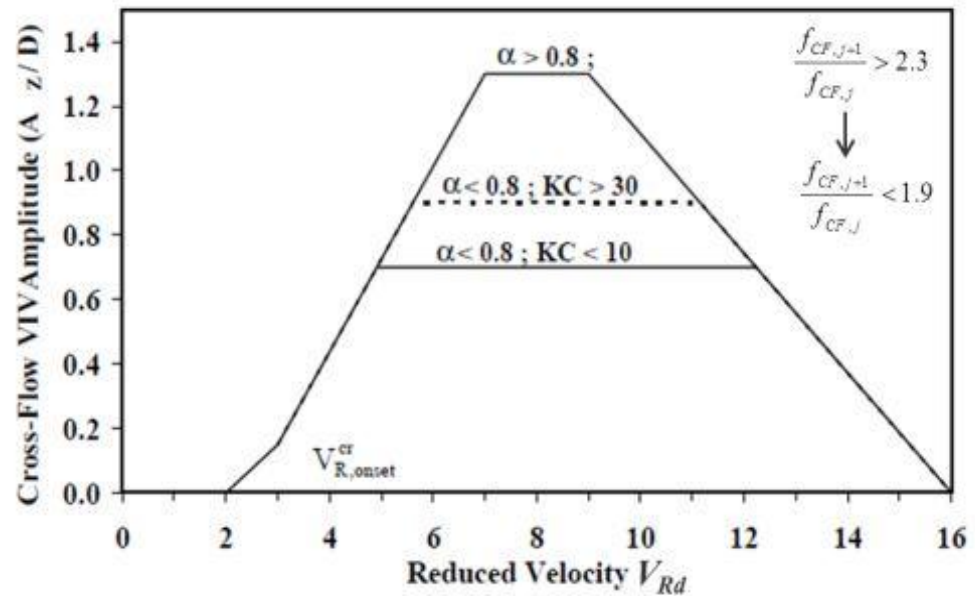
a. In-Line VIV



Gambar 4.4 Grafik Amplitudo *In-Line*

(sumber: DNV RP F105)

b. Cross Flow VIV



Gambar 4.5 Grafik Amplitudo *Cross Flow*

(sumber: DNV RP F105)

4.2.8 Perhitungan Beban Hidrodinamis

4.2.8.1 Perhitungan Gaya *Drag*

Gaya *drag* pada analisis VIV digunakan sebagai beban untuk analisis VIV arah in-line. Sebelum dapat melakukan perhitungan gaya *drag*, dibutuhkan koefisien *drag* yang didapatkan dari persamaan (2.30). dan perhitungan gaya *drag* menggunakan persamaan (2.29). Sehingga hasil perhitungan koefisien *drag* dan perhitungan gaya *drag* sebagai berikut:

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Gaya *Drag*

L(m)	C_D	$F_D(N/m)$
22,147	1,176	601,936
11,063	1,358	637,309
24,387	1,358	703,181
25,171	1,358	705,903
19,781	1,358	685,331
20,811	1,358	689,633

L(m)	C_D	F_D(N/m)
49,897	1,358	766,265
42,905	1,358	752,704
33,935	1,336	720,194
25,842	1,358	708,169
34,779	1,358	734,071
31,762	1,358	726,099
14,728	1,176	572,256
18,513	1,336	668,861
28,035	1,358	715,219

4.2.8.2 Perhitungan Gaya Lift

Gaya *lift* pada analisis VIV digunakan sebagai beban untuk menghitung tegangan bending statis. Sebelum dapat melakukan perhitungan gaya *lift* dibutuhkan koefisien *lift* yang didapatkan dari persamaan (2.35). Sehingga hasil perhitungan koefisien *lift* dan gaya *lift* sebagai berikut:

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Gaya Lift

L(m)	C_L	F_L (N/m)
22,147	0,700	214,540
11,063	0,700	196,751
24,387	0,700	217,086
25,171	0,700	217,927
19,781	0,700	211,576
20,811	0,700	212,904
49,897	0,700	236,562
42,905	0,700	232,375
33,935	0,700	225,955
25,842	0,700	218,626
34,779	0,700	226,623
31,762	0,700	224,162
14,728	0,700	203,961
18,513	0,700	209,850
28,035	0,700	220,803

4.2.9 Perhitungan Panjang Span Efektif

Panjang *span* efektif adalah panjang yang ideal untuk *span* yang memiliki *end-condition fixed-fixed* memiliki respon struktur (frekuensi natural) seperti *free*

span aktual yang bertumpu pada tanah (DNV RP F-105, 2006). Panjang *span* efektif ini dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu panjang *span actual* dan tingga *span (gap)*. Data panjang *span actual* dan *gap* didapatkan dari hasil inspeksi pada rute *pipeline*. Panjang *Span* efektif ditinjau berdasarkan *Cross-Flow* dan *In-Line*. Parameter kekakuan tanah (*Soil Stiffness*) berbeda pada kondisi *cross-flow* dan *in-line*, pada kondisi *In-Line* kekakuan tanah akan lebih kecil. Panjang *span* efektif berbanding terbalik dengan kekakuan tanah. Dan tumpuan yang digunakan adalah tumpuan *fixed-fixed*. Menurut DNV RP F105 pada tumpuan *fixed-fixed* $L_{eff}/L = 1$. Sehingga, panjang *span* efektif sama dengan panjang *span* aktual.

4.2.10 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Parameter Frekuensi Natural perlu di analisa karena frekuensi natural dapat beresonansi dengan frekuensi *vortex shedding*. Resonansi dapat menimbulkan kegagalan pipa. Jika, frekuensi natural lebih kecil dari frekuensi *vortex shedding* maka pipa akan mengalami kegagalan (Firdaus, dkk. 2014) .

4.2.10.1 Perhitungan Critical Buckling Load (Pcr)

Batas kekuatan *pipeline* tahan terhadap beban serta tekanan sebelum pipa mengalami *buckling*. Berikut hasil perhitungan *Pcr* menggunakan persamaan (2.51):

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load*

Panjang Span (m)	P_{cr} CF (Pa)	P_{cr} IL (Pa)
22,15	12390638,45	12390638,45
11,06	49654673,72	49654673,72
24,39	10218969,42	10218969,42
25,17	9592380,15	9592380,15
19,78	15532948,44	15532948,44
20,81	14033415,83	14033415,83
49,90	2441091,54	2441091,54
42,90	3301679,74	3301679,74
33,94	5277687,43	5277687,43
25,84	9101126,18	9101126,18
34,78	5024580,08	5024580,08
31,76	6024714,58	6024714,58
14,73	28019602,90	28019602,90
18,51	17733812,04	17733812,04
28,04	7732778,69	7732778,69

4.2.10.2 Defleksi

Pipa yang mengalami span akan mengalami defleksi akibat berbagai faktor, berikut hasil perhitungan defleksi pada pipa menggunakan persamaan (2.52):

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Defleksi

Panjang Span (m)	Defleksi CF (δ)	Defleksi IL (δ)
22,15	0,005	0,002
11,06	0,000	0,000
24,39	0,008	0,004
25,17	0,009	0,005
19,78	0,003	0,002
20,81	0,004	0,002
49,90	0,149	0,089
42,90	0,079	0,046
33,94	0,030	0,017
25,84	0,010	0,005
34,78	0,033	0,019
31,76	0,023	0,013
14,73	0,001	0,000
18,51	0,003	0,001
28,04	0,014	0,008

Maka didapatkan frekuensi natural pipa menggunakan persamaan (2.49). Berikut hasil perhitungan frekuensi natural:

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Frekuensi Natural

L (m)	f_n CF (Hz)	f_n IL (Hz)
22,147	3,197	3,197
11,063	13,411	13,411
24,387	2,785	2,784
25,171	2,616	2,616
19,781	4,216	4,216
20,811	3,812	3,812
49,897	0,692	0,689
42,905	0,922	0,921
33,935	1,439	1,439
25,842	2,483	2,483
34,779	1,385	1,385

L (m)	f_n CF (Hz)	f_n IL (Hz)
31,762	1,654	1,654
14,728	7,193	7,193
18,513	4,764	4,764
28,035	2,115	2,115

4.2.11 Analisa Frekuensi *Vortex Shedding*

Analisa frekuensi *vortex shedding* diperlukan untuk menghitung frekuensi yang diakibatkan oleh kecepatan arus yang terkena pipa. *Vortex* dapat menyebabkan perubahan tekanan hidrodinamis tersebut. Osilasi di sekitar *free span* akan terjadi ketika frekuensi *vortex shedding* sebesar atau lebih dari 1/3 frekuensi natural pipa. Sehingga untuk desain pipa frekuensi *vortex shedding* harus lebih kecil dari 0,7 dari frekuensi natural agar tidak terjadi osilasi (Putra, dkk, 2014). Dari hasil perhitungan frekuensi *vortex shedding* menggunakan persamaan (2.54) didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Frekuensi *Vortex Shedding*

L (m)	f_s (Hz)
22,147	0,351
11,063	0,336
24,387	0,353
25,171	0,354
19,781	0,349
20,811	0,350
49,897	0,369
42,905	0,365
33,935	0,360
25,842	0,354
34,779	0,361
31,762	0,359
14,728	0,342
18,513	0,347
28,035	0,356

4.2.12 Perhitungan Tegangan Dinamis

Tegangan pada *free span* akibat beban dinamis lingkungan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.56) dan (2.57). Berikut hasil dari perhitungan tegangan dinamis pada pipa akibat VIV:

Tabel 4.21 Hasil Perhitungan Tegangan Dinamis *Cross Flow*

L (m)	Acf (N/m^2)	Scf (N/m ²)	σ_{CF} (N/m ²)
22,15	5,74,E+08	2,06,E+07	1,03,E+07
11,06	5,18,E+08	1,78,E+08	8,89,E+07
24,39	5,39,E+08	1,85,E+08	9,25,E+07
25,17	5,33,E+08	1,83,E+08	9,14,E+07
19,78	5,14,E+08	1,76,E+08	8,82,E+07
20,81	5,45,E+08	1,87,E+08	9,35,E+07
49,90	5,59,E+08	1,92,E+08	9,59,E+07
42,90	5,53,E+08	1,90,E+08	9,50,E+07
33,94	5,17,E+08	1,47,E+08	7,33,E+07
25,84	5,41,E+08	1,86,E+08	9,29,E+07
34,78	5,18,E+08	1,78,E+08	8,89,E+07
31,76	5,10,E+08	1,75,E+08	8,76,E+07
14,73	5,74,E+08	2,06,E+07	1,03,E+07
18,51	5,17,E+08	1,47,E+08	7,33,E+07
28,04	5,14,E+08	1,76,E+08	8,82,E+07

Tabel 4.22 Hasil Perhitungan Tegangan Dinamis *In Line*

L (m)	Ail (N/m^2)	Sil (N/m ²)	σ_{IL} (N/m ²)
22,15	3,91,E+08	1,09,E+08	5,46,E+07
11,06	8,86,E+07	2,31,E+07	1,16,E+07
24,39	4,26,E+08	1,20,E+08	5,99,E+07
25,17	4,54,E+08	1,29,E+08	6,44,E+07
19,78	2,82,E+08	7,75,E+07	3,87,E+07
20,81	3,11,E+08	8,57,E+07	4,28,E+07
49,90	1,72,E+09	5,23,E+08	2,61,E+08
42,90	1,29,E+09	3,85,E+08	1,92,E+08
33,94	8,33,E+08	2,42,E+08	1,21,E+08
25,84	4,78,E+08	1,36,E+08	6,78,E+07
34,78	8,58,E+08	2,51,E+08	1,26,E+08
31,76	7,18,E+08	2,09,E+08	1,04,E+08
14,73	1,74,E+08	4,61,E+07	2,31,E+07
18,51	2,52,E+08	6,84,E+07	3,42,E+07
28,04	5,62,E+08	1,61,E+08	8,06,E+07

4.2.13 Analisa *Allowable Free Span Length*

Setelah melakukan perhitungan frekuensi natural arah *in-line* dan *cross flow*, dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan panjang maksimum *span* yang diijinkan (panjang *span* kritis). Analisa panjang *span* kritis berdasarkan Guo, dkk. menggunakan beberapa parameter yang perlu diperhitungkan. Berikut hasil perhitungan yang didapatkan dari persamaan (2.58) dan (2.59):

Tabel 4.23 Perhitungan *Allowable Free Span Length* kondisi *cross flow*

L	L_c CF
22,147	38,084
11,063	40,094
24,387	39,289
25,171	39,540
19,781	40,236
20,811	39,078
49,897	38,590
42,905	38,785
33,935	40,124
25,842	39,215
34,779	40,094
31,762	40,394
14,728	38,084
18,513	40,124
28,035	40,236

Tabel 4.24 Perhitungan *Allowable Free Span Length* kondisi *in-line*

Panjang Span	L_c IL
22,147	46,115
11,063	96,963
24,387	44,183
25,171	42,822
19,781	54,369
20,811	51,698
49,897	21,980
42,905	25,404
33,935	31,611
25,842	41,724
34,779	31,157
31,762	34,055
14,728	69,170

Panjang Span	L_c IL
18,513	57,513
28,035	38,502

4.2.14 Screening Vortex Induced Vibration (VIV)

Screening bertujuan untuk menentukan apakah akan terjadi VIV pada pipa yang mengalami *free span*. Menurut DNV RP F105 dapat dihitung menggunakan persamaan (2.56) dan (2.57). Hasil dari *screening* kriteria VIV, sebagai berikut:

Tabel 4.25 Hasil *Screening VIV*

L (m)	VIV CF	VIV IL
22,147	TIDAK VIV	TIDAK VIV
11,063	TIDAK VIV	TIDAK VIV
24,387	TIDAK VIV	TIDAK VIV
25,171	TIDAK VIV	TIDAK VIV
19,781	TIDAK VIV	TIDAK VIV
20,811	TIDAK VIV	TIDAK VIV
49,897	VIV	VIV
42,905	VIV	VIV
33,935	TIDAK VIV	VIV
25,842	TIDAK VIV	TIDAK VIV
34,779	TIDAK VIV	VIV
31,762	TIDAK VIV	VIV
14,728	TIDAK VIV	TIDAK VIV
18,513	TIDAK VIV	TIDAK VIV
28,035	TIDAK VIV	TIDAK VIV

Berdasarkan *screening* kriteria VIV menurut DNV, pada kondisi in-line terdapat 5 titik *span* yang mengalami VIV.

Maka, pipa yang melebihi panjang kritis kemungkinan mengalami kegagalan. Pipa yang melebihi panjang kritis berjumlah 4 titik *span*, pada *span* dengan panjang 49.9 m, 42.9 m, 33.9 m, 34.8 m dan 31.8 m.

4.2.15 Screening Kriteria *Free Span*

Menurut Guo, dkk., *screening* dapat dihitung dengan 5 persamaan pada Tabel 2.6. Berikut hasil *screening* kriteria *free span* pada kondisi *Cross Flow*:

Tabel 4.26 Hasil *Screening* Kriteria (Frekuensi Natural dan *Vortex Shedding*)
Cross Flow

L (m)	f_s (Hz)	f_n CF (Hz)	Screening
22,147	0,351	2,238	TIDAK KRITIS
11,063	0,336	9,388	TIDAK KRITIS
24,387	0,353	1,949	TIDAK KRITIS
25,171	0,354	1,831	TIDAK KRITIS
19,781	0,349	2,951	TIDAK KRITIS
20,811	0,350	2,669	TIDAK KRITIS
49,897	0,369	0,484	TIDAK KRITIS
42,905	0,365	0,645	TIDAK KRITIS
33,935	0,360	1,008	TIDAK KRITIS
25,842	0,354	1,738	TIDAK KRITIS
34,779	0,361	0,970	TIDAK KRITIS
31,762	0,359	1,158	TIDAK KRITIS
14,728	0,342	5,035	TIDAK KRITIS
18,513	0,347	3,335	TIDAK KRITIS
28,035	0,356	1,480	TIDAK KRITIS

Tabel 4.27 Hasil *Screening* Kriteria (*Allowable Span Length*) *Cross Flow*

L	L_c CF	Screening
22,147	38,084	TIDAK KRITIS
11,063	40,094	TIDAK KRITIS
24,387	39,289	TIDAK KRITIS
25,171	39,540	TIDAK KRITIS
19,781	40,236	TIDAK KRITIS
20,811	39,078	TIDAK KRITIS
49,897	38,590	KRITIS
42,905	38,785	KRITIS
33,935	40,124	TIDAK KRITIS
25,842	39,215	TIDAK KRITIS
34,779	40,094	TIDAK KRITIS
31,762	40,394	TIDAK KRITIS
14,728	38,084	TIDAK KRITIS
18,513	40,124	TIDAK KRITIS
28,035	40,236	TIDAK KRITIS

Tabel 4.28 Hasil *Screening* Kriteria (*Critical Buckling Load*) *Cross Flow*

L (m)	Pcr Batas	Pcr	Screening
22,147	4252302,12	12390638,45	TIDAK KRITIS
11,063	4252302,12	49654673,72	TIDAK KRITIS

L (m)	Pcr Batas	Pcr	Screening
24,387	4252302,12	10218969,42	TIDAK KRITIS
25,171	4252302,12	9592380,151	TIDAK KRITIS
19,781	4252302,12	15532948,44	TIDAK KRITIS
20,811	4252302,12	14033415,83	TIDAK KRITIS
49,897	4252302,12	2441091,537	KRITIS
42,905	4252302,12	3301679,739	KRITIS
33,935	4252302,12	5277687,427	TIDAK KRITIS
25,842	4252302,12	9101126,182	TIDAK KRITIS
34,779	4252302,12	5024580,079	TIDAK KRITIS
31,762	4252302,12	6024714,576	TIDAK KRITIS
14,728	4252302,12	28019602,9	TIDAK KRITIS
18,513	4252302,12	17733812,04	TIDAK KRITIS
28,035	4252302,12	7732778,686	TIDAK KRITIS

Tabel 4.29 Hasil *Screening* Kriteria (Defleksi) *Cross Flow*

L (m)	Defleksi	10D	Screening
22,147	0,005	5,990	TIDAK KRITIS
11,063	0,000	5,990	TIDAK KRITIS
24,387	0,008	5,990	TIDAK KRITIS
25,171	0,009	5,990	TIDAK KRITIS
19,781	0,003	5,990	TIDAK KRITIS
20,811	0,004	5,990	TIDAK KRITIS
49,897	0,149	5,990	TIDAK KRITIS
42,905	0,079	5,990	TIDAK KRITIS
33,935	0,030	5,990	TIDAK KRITIS
25,842	0,010	5,990	TIDAK KRITIS
34,779	0,033	5,990	TIDAK KRITIS
31,762	0,023	5,990	TIDAK KRITIS
14,728	0,001	5,990	TIDAK KRITIS
18,513	0,003	5,990	TIDAK KRITIS
28,035	0,014	5,990	TIDAK KRITIS

Tabel 4.30 Hasil *Screening* Kriteria (Gap Span) *Cross Flow dan In Line*

L (m)	Gap (m)	5D	Screening
22,147	0,200	2,995	TIDAK KRITIS
11,063	0,900	2,995	TIDAK KRITIS
24,387	1,700	2,995	TIDAK KRITIS
25,171	1,400	2,995	TIDAK KRITIS
19,781	0,800	2,995	TIDAK KRITIS
20,811	2,000	2,995	TIDAK KRITIS

L (m)	Gap (m)	5D	Screening
49,897	2,900	2,995	TIDAK KRITIS
42,905	2,500	2,995	TIDAK KRITIS
33,935	0,400	2,995	TIDAK KRITIS
25,842	1,800	2,995	TIDAK KRITIS
34,779	0,900	2,995	TIDAK KRITIS
31,762	0,700	2,995	TIDAK KRITIS
14,728	0,200	2,995	TIDAK KRITIS
18,513	0,400	2,995	TIDAK KRITIS
28,035	0,800	2,995	TIDAK KRITIS

Sedangkan, berdasarkan *screening* pada kondisi *In-line* sebagai berikut:

Tabel 4.31 Hasil *Screening* Kriteria (Frekuensi Natural dan *Vortex Shedding*) *In Line*

L (m)	f_s (Hz)	f_n CF (Hz)	Screening
22,147	0,351	2,238	TIDAK KRITIS
11,063	0,336	9,388	TIDAK KRITIS
24,387	0,353	1,949	TIDAK KRITIS
25,171	0,354	1,831	TIDAK KRITIS
19,781	0,349	2,951	TIDAK KRITIS
20,811	0,350	2,669	TIDAK KRITIS
49,897	0,369	0,482	TIDAK KRITIS
42,905	0,365	0,644	TIDAK KRITIS
33,935	0,360	1,007	TIDAK KRITIS
25,842	0,354	1,738	TIDAK KRITIS
34,779	0,361	0,969	TIDAK KRITIS
31,762	0,359	1,158	TIDAK KRITIS
14,728	0,342	5,035	TIDAK KRITIS
18,513	0,347	3,335	TIDAK KRITIS
28,035	0,356	1,480	TIDAK KRITIS

Tabel 4.32 Hasil *Screening* Kriteria (*Allowable Span Length*) *In Line*

L (m)	L_c IL (m)	Screening
22,147	46,115	TIDAK KRITIS
11,063	96,963	TIDAK KRITIS
24,387	44,183	TIDAK KRITIS
25,171	42,822	TIDAK KRITIS
19,781	54,369	TIDAK KRITIS
20,811	51,698	TIDAK KRITIS

L (m)	L_c IL (m)	Screening
49,897	21,980	KRITIS
42,905	25,404	KRITIS
33,935	31,611	KRITIS
25,842	41,724	TIDAK KRITIS
34,779	31,157	KRITIS
31,762	34,055	TIDAK KRITIS
14,728	69,170	TIDAK KRITIS
18,513	57,513	TIDAK KRITIS
28,035	38,502	TIDAK KRITIS

Tabel 4.33 Hasil *Screening* Kriteria (Defleksi) *In Line*

L (m)	Defleksi	10D	Screening
22,147	0,002	5,990	TIDAK KRITIS
11,063	0,000	5,990	TIDAK KRITIS
24,387	0,004	5,990	TIDAK KRITIS
25,171	0,004	5,990	TIDAK KRITIS
19,781	0,001	5,990	TIDAK KRITIS
20,811	0,002	5,990	TIDAK KRITIS
49,897	0,075	5,990	TIDAK KRITIS
42,905	0,039	5,990	TIDAK KRITIS
33,935	0,013	5,990	TIDAK KRITIS
25,842	0,005	5,990	TIDAK KRITIS
34,779	0,015	5,990	TIDAK KRITIS
31,762	0,010	5,990	TIDAK KRITIS
14,728	0,000	5,990	TIDAK KRITIS
18,513	0,001	5,990	TIDAK KRITIS
28,035	0,006	5,990	TIDAK KRITIS

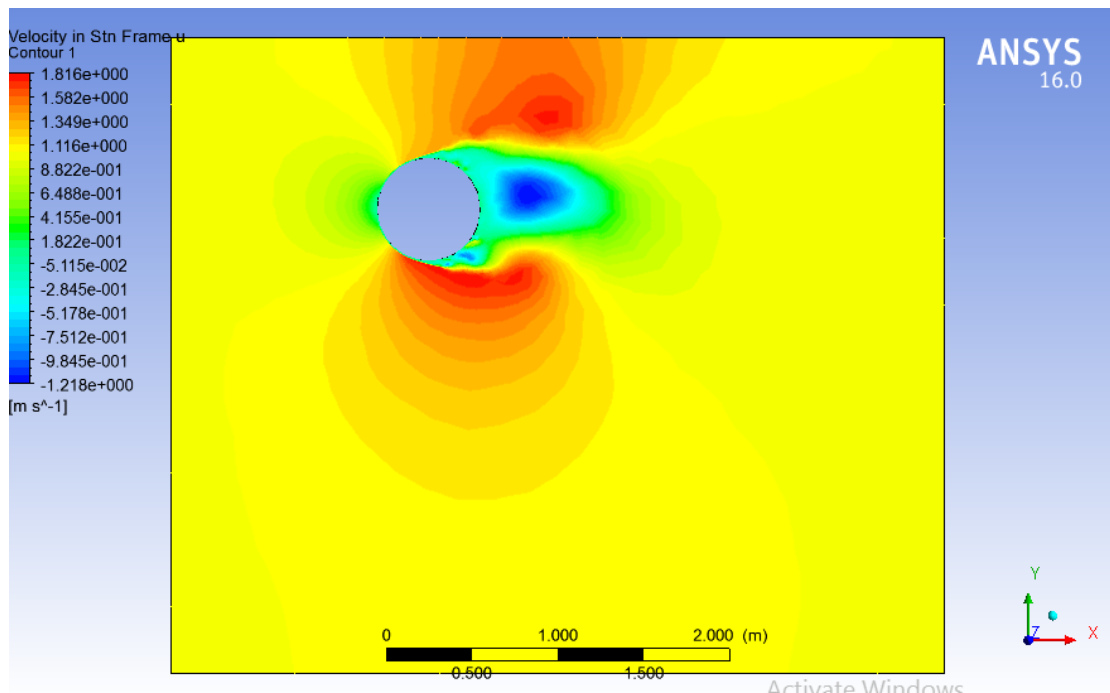
Sehingga, berdasarkan *screening* yang dilakukan dengan persamaan yang didapat dari DNV RP F105 dan Guo, dkk. Didapatkan hasil 4 pipa mengalami kondisi kritis dan memerlukan mitigasi, yaitu pipa yang mengalami *free span* 49.9 m, 42.9 m, 33.9 m, 34.8 m.

4.2.16 Simulasi dengan Software ANSYS Fluent

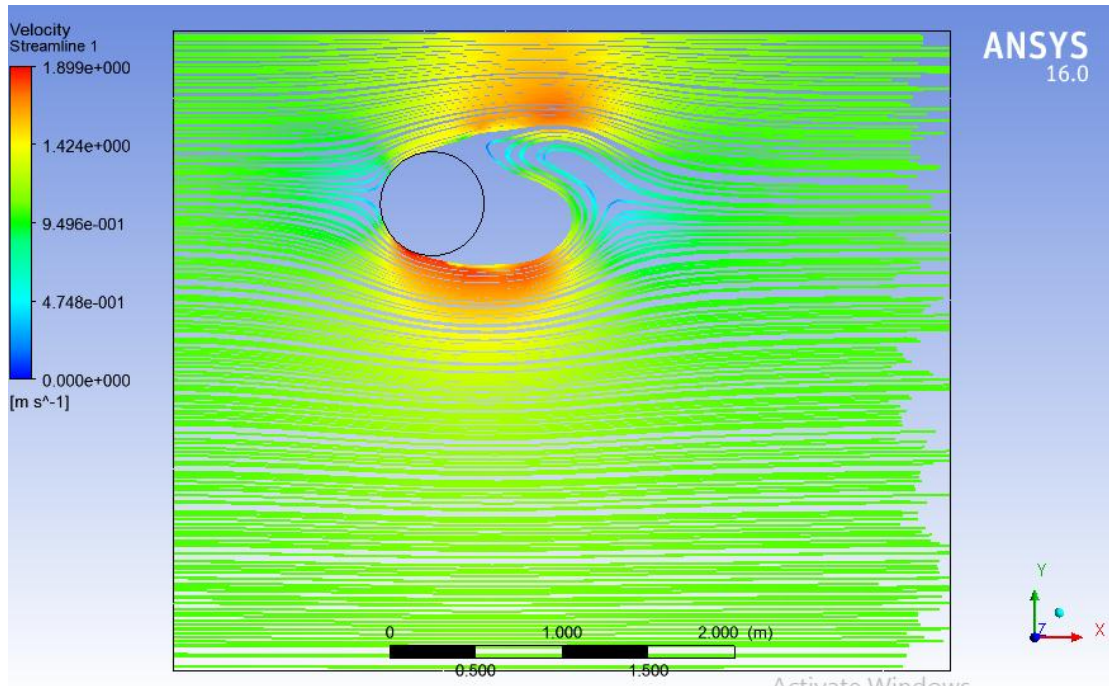
ANSYS CFD Fluent digunakan untuk memprediksi fenomena aliran fluida yang terjadi disekitar pipa. CFD (*Computational Fluid Dynamics*) adalah analisa sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan kalor dan fenomena lain yang

berkaitan, seperti, reaksi kimia dengan menggunakan simulasi yang berbasis komputer. Dalam tugas akhir ini akan mensimulasikan CFD menggunakan ANSYS CFD Software. Simulasi akan dilakukan pada kondisi pipa yang mengalami kondisi kritis. Sehingga, ada 4 titik *span* yang akan disimulasikan pada tugas akhir ini. Pipa yang mengalami panjang span 49.9 m, 42.9 m, 33.9 m, 34.8 m.

Hasil simulasi pada ANSYS Fluent pada pipa yang mengalami span 49.9 m dapat dilihat sebagai berikut:

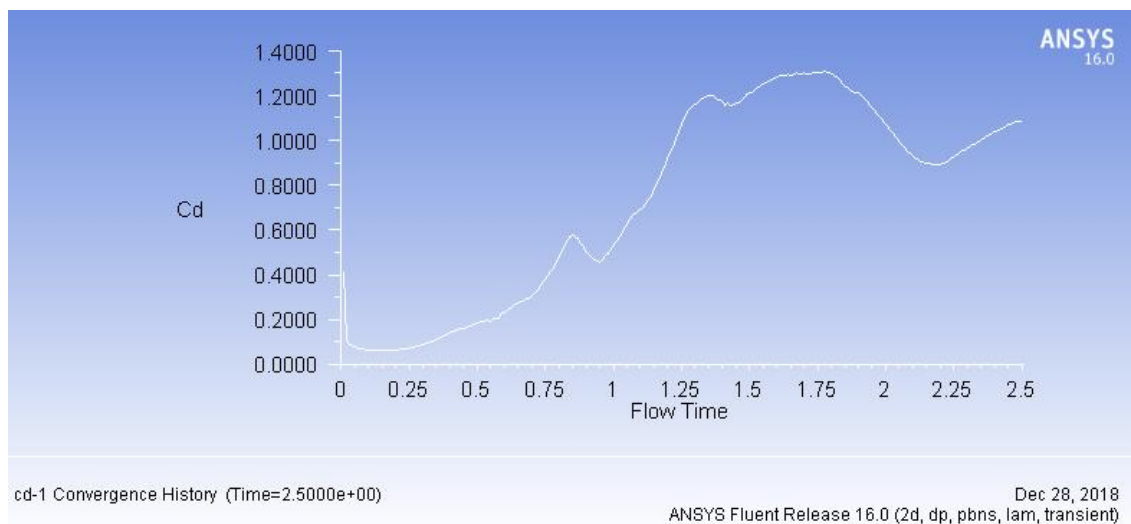


Gambar 4.6 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada Span 49.9 m (*Contour*)



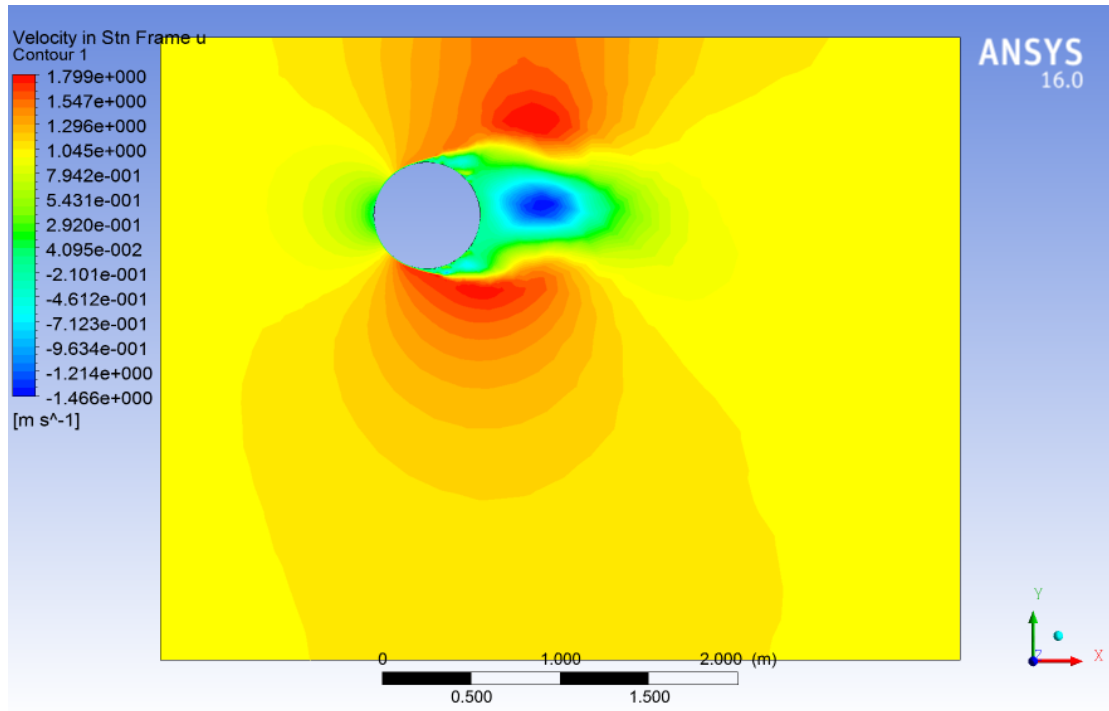
Gambar 4.7 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 49.9 m (*Streamline*)

Dari simulasi pada ANSYS Fluent dihasilkan output berupa grafik koefisien *drag* berdasarkan *time flow*. Berikut grafik koefisien *drag* yang dihasilkan oleh Simulasi pada ANSYS Fluent:

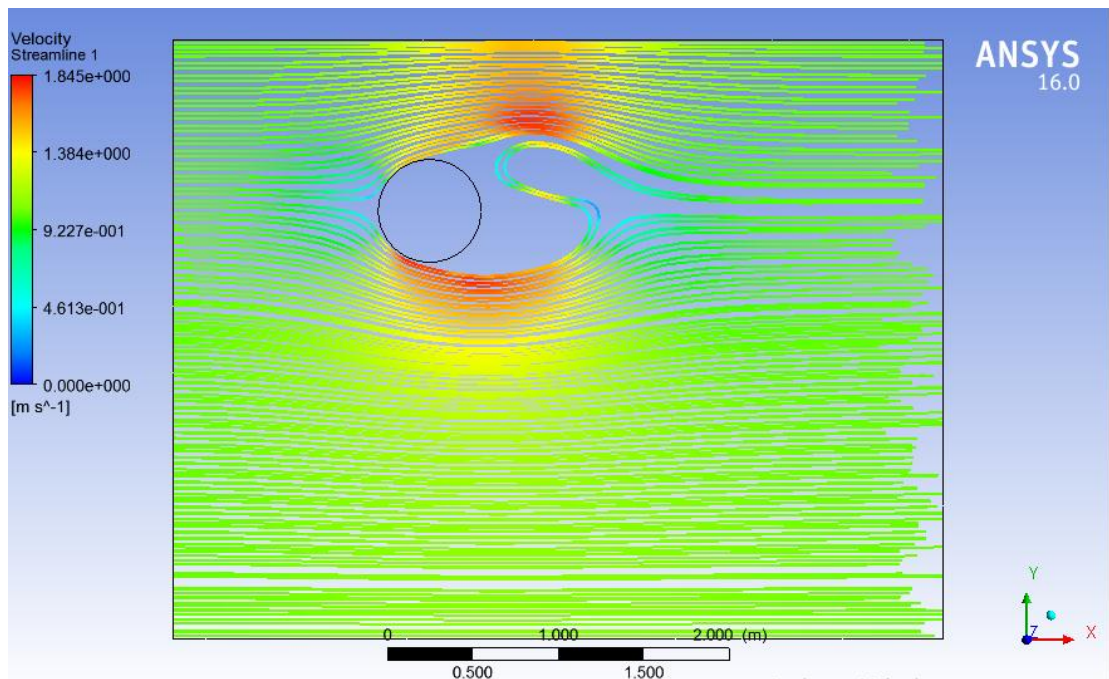


Gambar 4.8 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 49.9 m (Grafik C_D)

Hasil simulasi pada ANSYS Fluent pada pipa yang mengalami *span* 42.9 m dapat dilihat sebagai berikut:

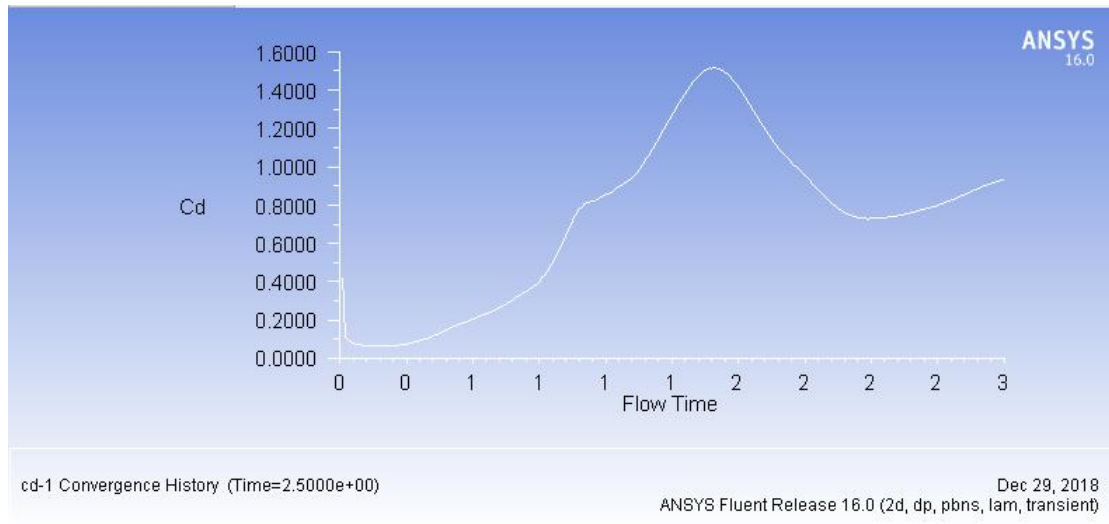


Gambar 4.9 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 42.9 m (*Contour*)



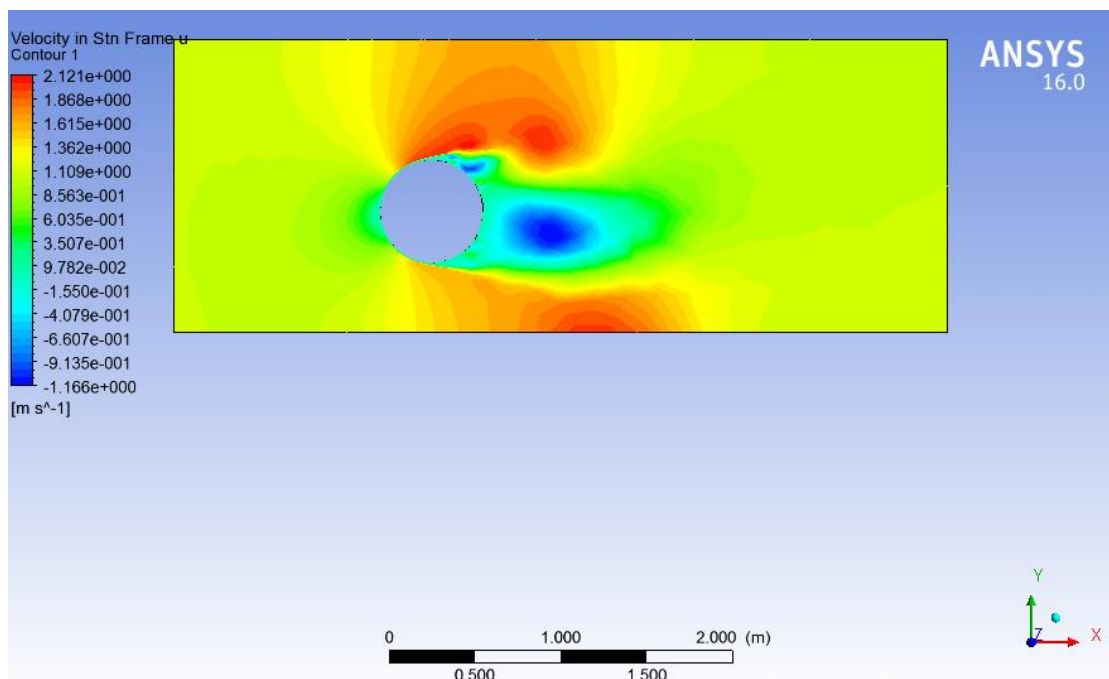
Gambar 4.10 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 42.9 m (*Streamline*)

Dari simulasi pada ANSYS Fluent dihasilkan output berupa grafik koefisien *drag* berdasarkan *time flow*. Berikut grafik koefisien *drag* yang dihasilkan oleh Simulasi pada ANSYS Fluent:

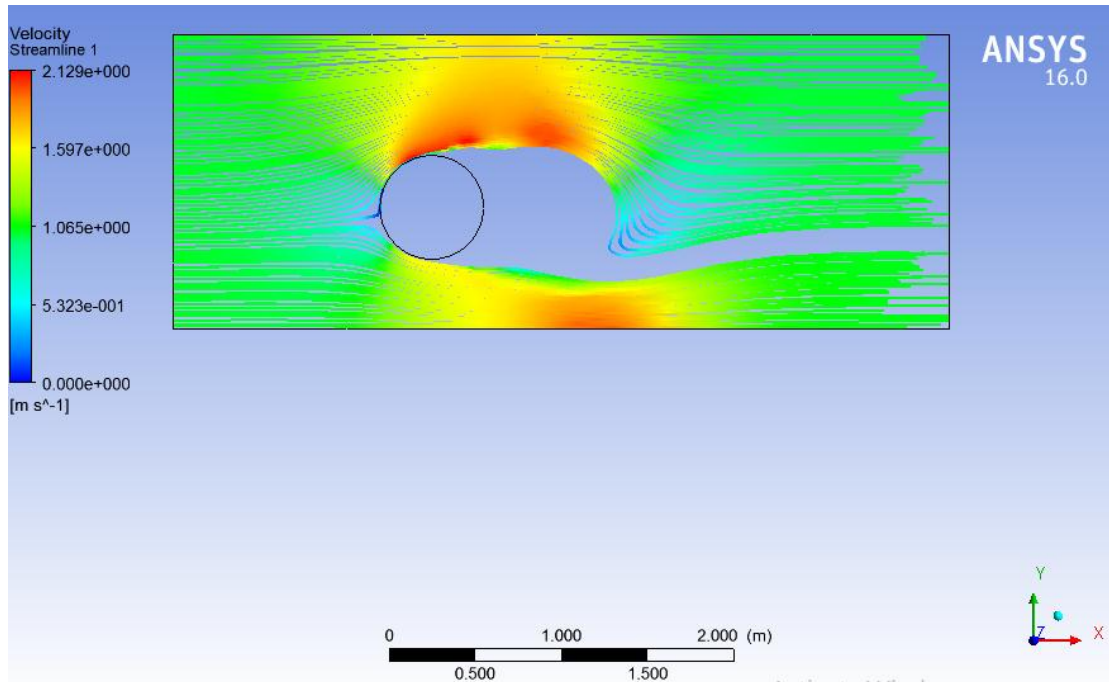


Gambar 4.11 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 42.9 m (Grafik C_D)

Hasil simulasi pada ANSYS Fluent pada pipa yang mengalami *span* 33.9 m dapat dilihat sebagai berikut:

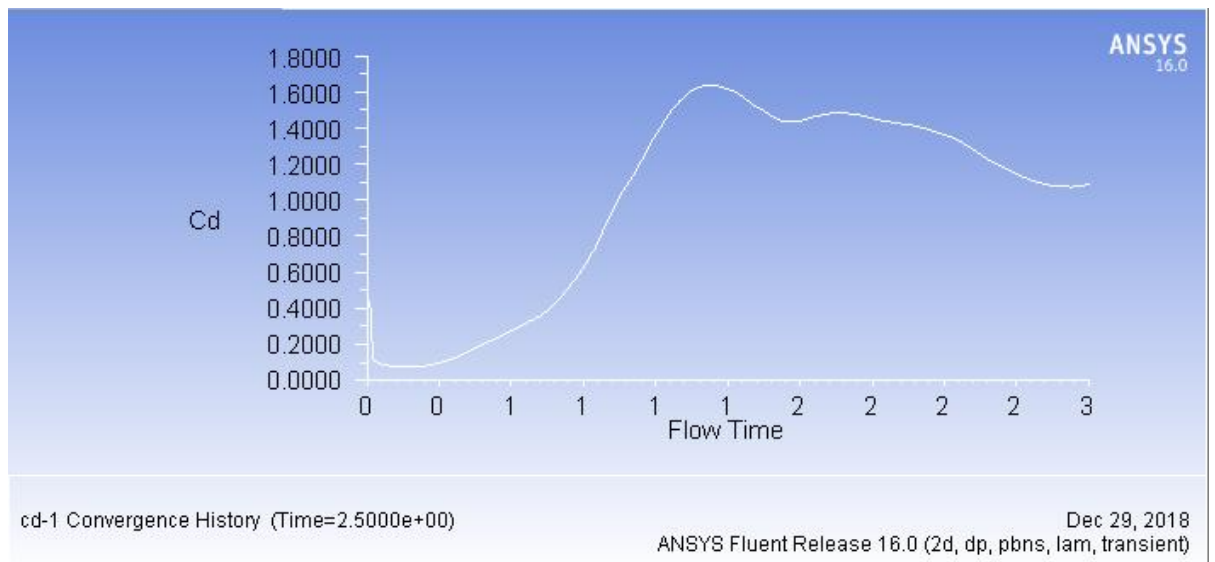


Gambar 4.12 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 33.9 m (*Contour*)



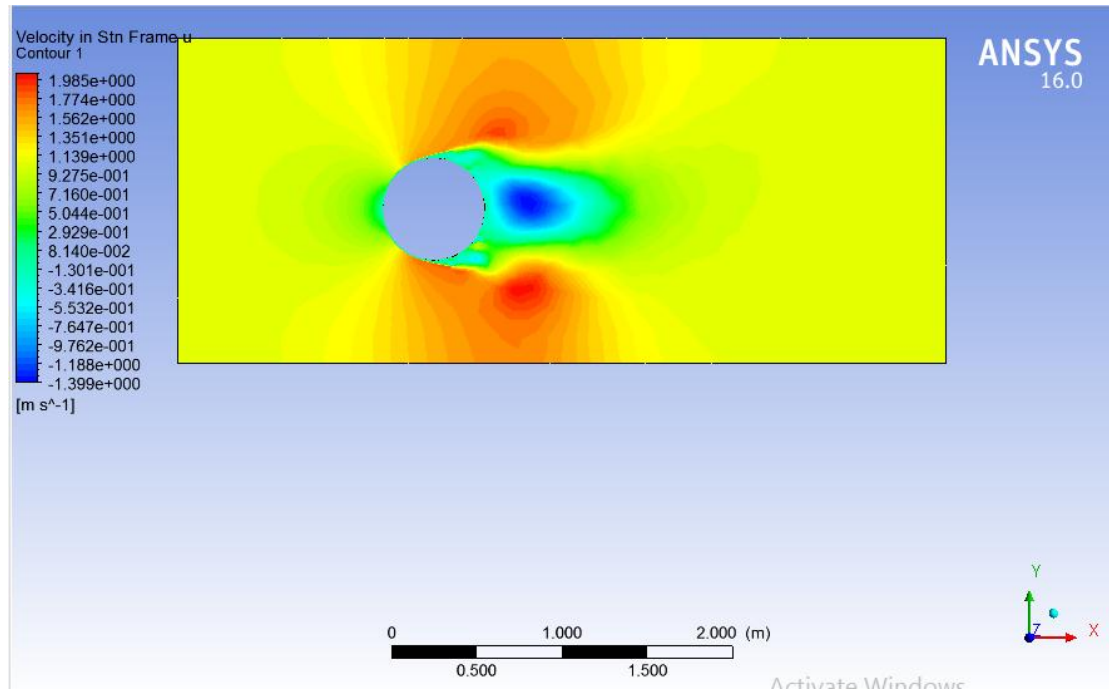
Gambar 4.13 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 33.9 m (*Streamline*)

Dari simulasi pada ANSYS Fluent dihasilkan output berupa grafik koefisien *drag* berdasarkan time flow. Berikut grafik koefisien *drag* yang dihasilkan oleh Simulasi pada ANSYS Fluent:

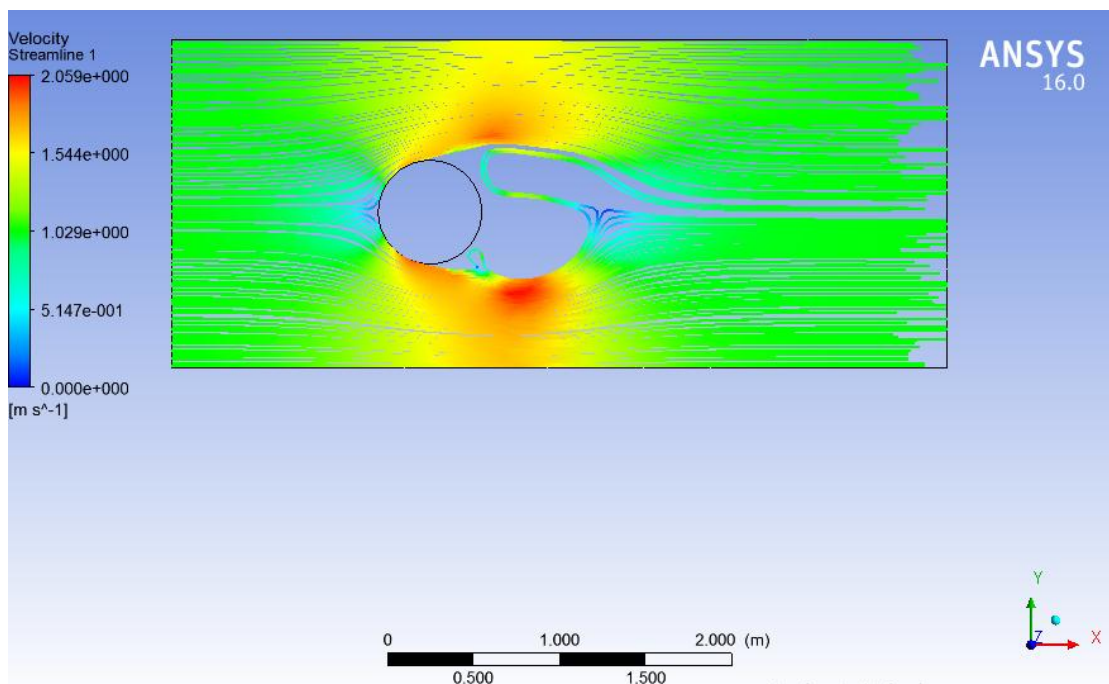


Gambar 4.14 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 33.9 m (Grafik C_D)

Hasil simulasi pada ANSYS Fluent pada pipa yang mengalami *span* 34.8 m dapat dilihat sebagai berikut:

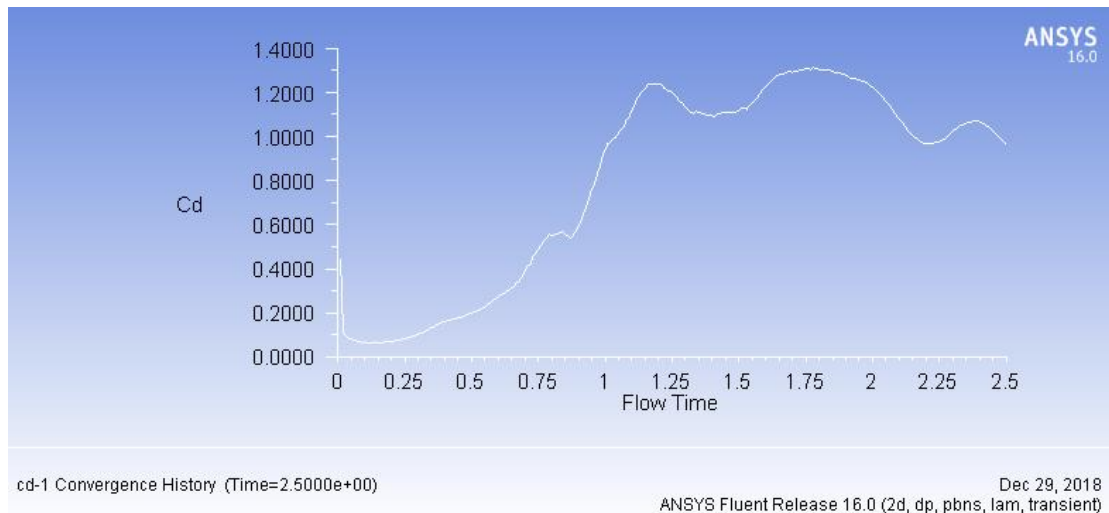


Gambar 4.15 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 34.8 m (*Contour*)



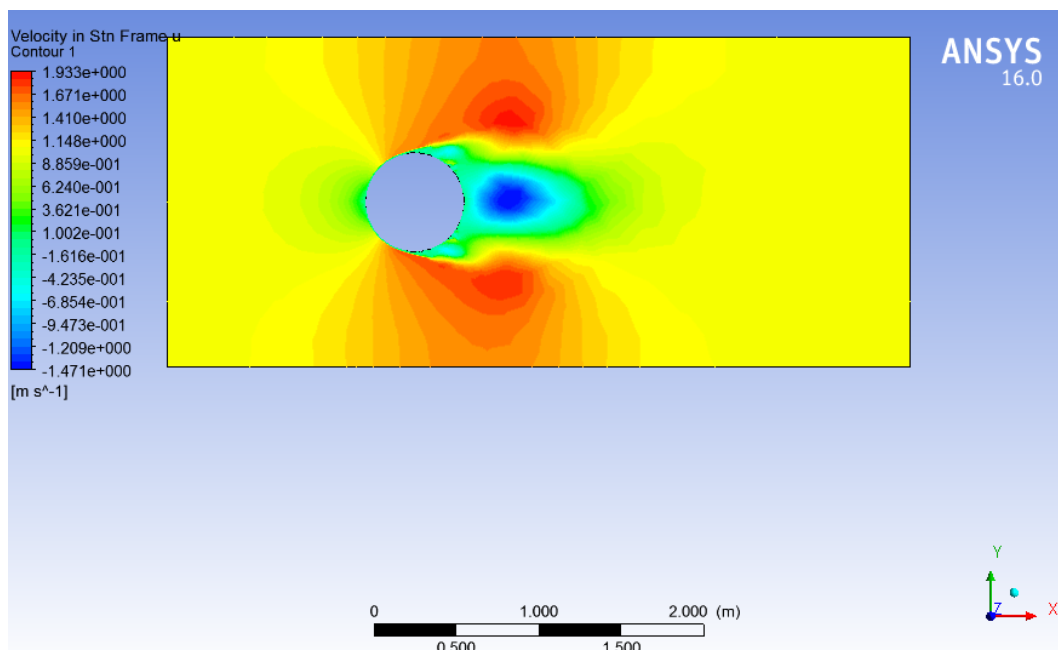
Gambar 4.16 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 34.8 m (*Streamline*)

Dari simulasi pada ANSYS Fluent dihasilkan output berupa grafik koefisien *drag* berdasarkan *time flow*. Berikut grafik koefisien *drag* yang dihasilkan oleh Simulasi pada ANSYS Fluent:

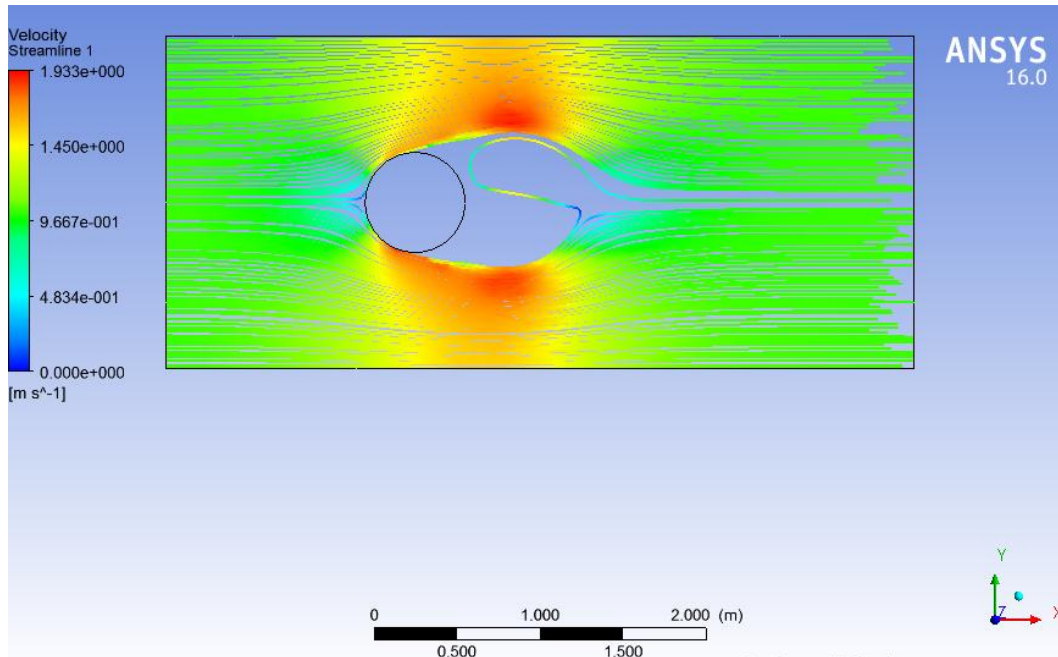


Gambar 4.17 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 34.8 m (Grafik C_D)

Hasil simulasi pada ANSYS Fluent pada pipa yang mengalami *span* 34.8 m dapat dilihat sebagai berikut:

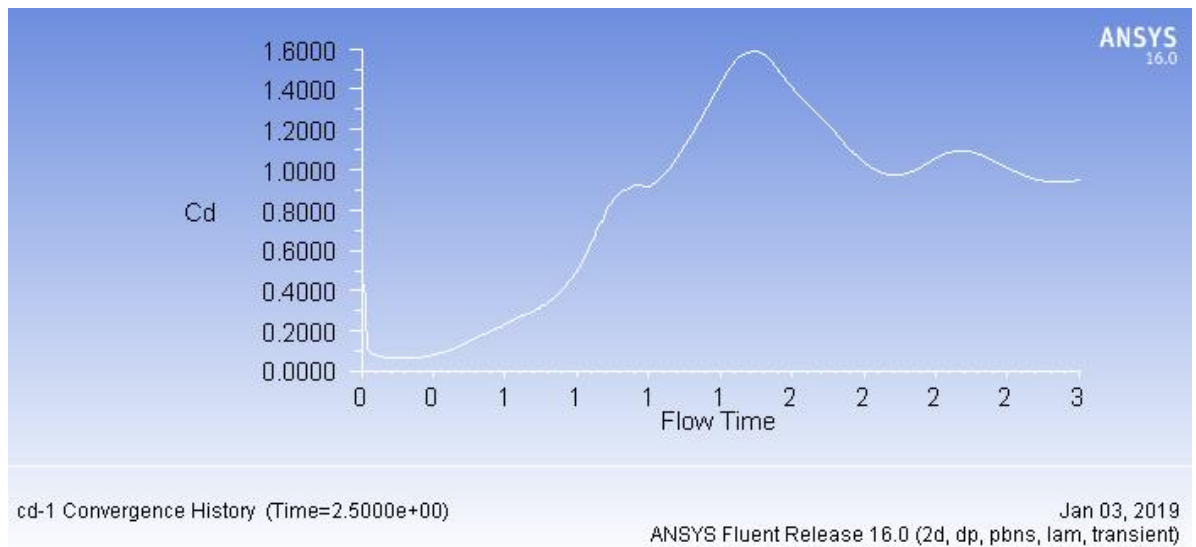


Gambar 4.18 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 31.8 m (*Contour*)



Gambar 4.19 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 31.8 m (*Streamline*)

Dari simulasi pada ANSYS Fluent dihasilkan output berupa grafik koefisien *drag* berdasarkan *time flow*. Berikut grafik koefisien *drag* yang dihasilkan oleh Simulasi pada ANSYS Fluent:



Gambar 4.20 Hasil Simulasi ANSYS Fluent pada *Span* 31.8 m (Grafik C_D)

Berikut validasi hasil gaya *drag* dari perhitungan manual dan simulasi pada ANSYS Fluent:

Tabel 4.34 Tabel Validasi Gaya *Drag* Manual dan ANSYS Fluent

L(m)	C_D	F_D (N/m)	C_D ANSYS	F_D ANSYS
49,897	1,358	766,265	1,330	750,363
42,905	1,358	752,704	1,520	842,381
33,935	1,336	720,194	1,630	878,385
34,779	1,358	734,071	1,310	708,028
31,762	1,358	726,099	1,600	855,375

Perbedaan yang terdapat pada koefisien *drag* dari hitungan manual dan ANSYS disebabkan ketidaktekelitian dalam membentuk geometri batas dinding luar pipa dan *meshing*. Serta, kemungkinan perbedaan formula yang digunakan *software* dan perhitungan manual.

4.2.17 Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo pada kasus ini menggunakan moda kegagalan dengan persamaan *screening* terjadi VIV menurut DNV RP F105 yaitu sebagai berikut:

$$f_{IL,1} > \frac{U_{\text{extreme}} Y_{f,IL}}{V_{R,\text{onset}}^{IL} D}$$

Jika persamaan diatas tidak terpenuhi maka akan terjadi VIV dan dianggap gagal. Simulasi monte carlo menggunakan screening pada *in-line* VIV dikarenakan awal mula terjadinya VIV pada kondisi *in-line*. Ruas kiri persamaan *screening* VIV terdapat frekuensi natural menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$f_n = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF)} \times \sqrt{\frac{E_{\text{pipa}} \times I_{\text{pipa}}}{M_{\text{eff}} \times L_{\text{eff}}^4} \times \left(\left(1 + \frac{S_{\text{eff}}}{P_{\text{cr}}} \right) + \left(C_3 \times \left(\frac{\delta}{D_{\text{tot}}} \right)^2 \right) \right)}$$

dengan, menggunakan variabel acak gaya drag atau beban (q) pada persamaan defleksi (δ). Berikut persamaan untuk menghitung defleksi:

$$\delta = C_6 \cdot \frac{q \times L^4_{\text{eff}}}{E.I.(1+CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{\text{eff}}}{P_{\text{cr}}} \right)}$$

Ruas kanan menggunakan variabel acak U_{extreme} dengan persamaan sebagai berikut:

$$U_{\text{extreme}} = (U_c + U_w)$$

4.2.17.1 Penentuan Variabel Acak

Parameter-parameter yang digunakan dalam persamaan moda kegagalan, beberapa digunakan sebagai variabel acak. Pada kasus ini, digunakan variabel acak yaitu *Current Velocity* 100 tahun (U_c) dan *Critical Buckling Load* (P_{cr}).

Tabel 4.35 Variabel Acak Simulasi Monte Carlo

Variabel Acak	Range
Kecepatan Arus 100 Tahun (m/s)	0.868 - 0.961
Gaya Drag (N/m)	572.256 - 766.265

4.2.17.2 Parameter Statistik

Setelah menentukan variabel acak, menentukan parameter-parameter statistik seperti *mean* dan standar deviasi untuk dimasukkan ke persamaan Moda Kegagalan.

Tabel 4.36 Parameter Statistik

Parameter Statistik	U_c (m/s)	q (N/m)
Mean (μ)	0.915	669.750
Standar Deviasi	0.027	56.175

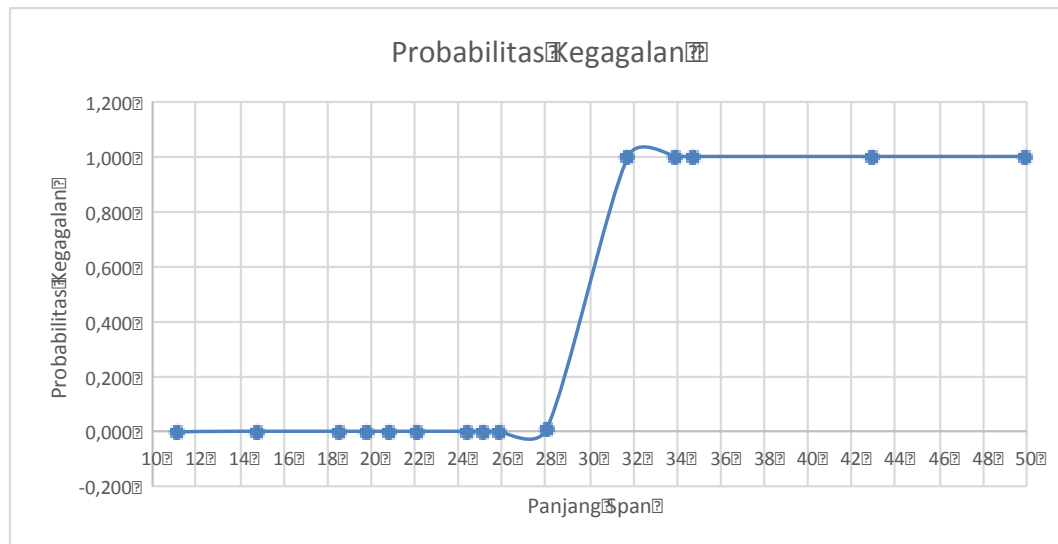
4.2.17.3 Hasil Simulasi Monte Carlo

Setelah dilakukan percobaan sampai 10000 kali hasil probabilitas tiap 1000 kali percobaan menghasilkan hasil yang tidak memiliki perbedaan signifikan, maka didapatkan hasil probabilitas kegagalan pada tiap titik *span* sebagai berikut:

Tabel 4.37 Hasil Simulasi Monte Carlo

L (m)	Probabilitas Kegagalan
11.063	0.000
14.728	0.000
18.513	0.000
19.781	0.000
20.811	0.000
22.147	0.000
24.387	0.001
25.171	0.001
25.842	0.001
28.035	0.032
31.762	0.996
33.935	0.998

L (m)	Probabilitas Kegagalan
34.779	0.998
42.905	0.999
49.897	0.999



Gambar 4.21 Hasil Simulasi *Monte Carlo* (Peluang Kegagalan)

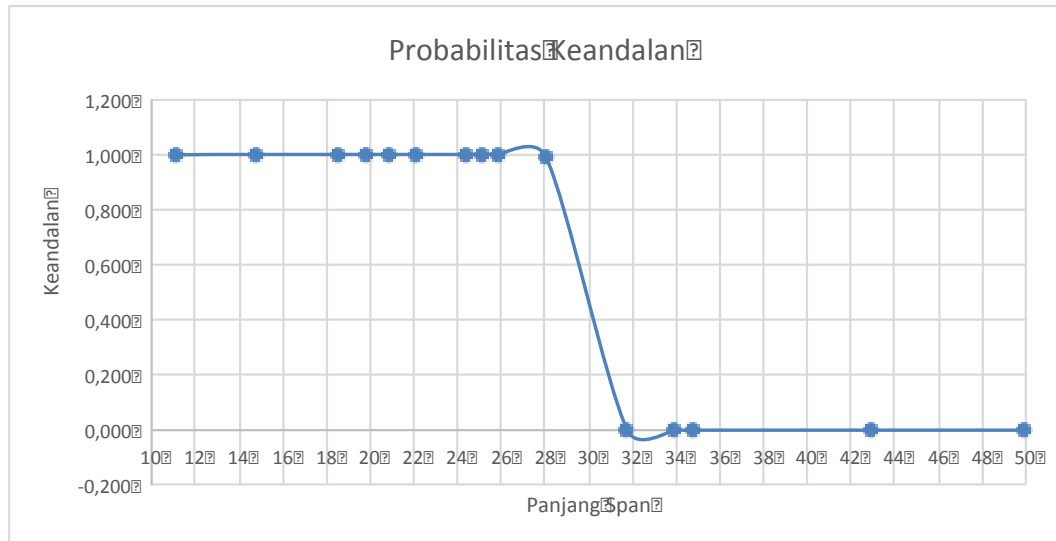
Dari grafik diatas dapat menunjukkan peluang kegagalan akan semakin membesar dengan pertambahan panjang *span* yang terjadi. Pada 5 titik *span* terpanjang 31.8 m, 33.9 m, 34.8 m, 42.9 m, 49.9 m mengalami probabilitas kegagalan 0.998-0.999.

Sehingga di dapatkan peluang keandalan sebagai berikut:

Tabel 4.38 Peluang Keandalan

L (m)	Probabilitas Keandalan
11.063	1.000
14.728	1.000
18.513	1.000
19.781	1.000
20.811	1.000
22.147	1.000
24.387	0.999
25.171	0.999
25.842	0.999
28.035	0.968

L (m)	Probabilitas Keandalan
31.762	0.004
33.935	0.002
34.779	0.002
42.905	0.001
49.897	0.001



Gambar 4.22 Hasil Simulasi *Monte Carlo* (Probabilitas Keandalan)

Dari grafik diatas dapat menunjukkan peluang keandalan akan semakin menurun dengan pertambahan panjang *span* yang terjadi. Pada 5 titik *span* terpanjang 31.8 m, 33.9 m, 34.8 m, 42.9 m, 49.9 m memiliki peluang keandalan 0.001 - 0.002 sehingga dikatakan gagal atau mengalami VIV. Sehingga 5 titik *span* terpanjang diperlukan adanya mitigasi berupa *support* untuk mengurangi panjang *span* dan efek terjadi VIV.

4.2.18 Mitigasi

Setelah melakukan analisis dan *screening* kriteria VIV, pipa yang mengalami panjang *span* 49.9 m, 42.9 m, 33.9 m, 34.8 m dan 31.8 m membutuhkan pemasangan *support* untuk mitigasi.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain:

1. Panjang *span* aktual yang melebihi panjang *span* kritis atau *Allowable Span Length* maka pipa mengalami kondisi kritis. Dari hasil analisis 15 titik *span* pada kondisi *cross flow* terjadi pada 2 titik *span* dengan panjang 49.9 m dan 42.9 m. Sedangkan pada kondisi *In-Line* di 4 titik *span* dengan panjang 49.9 m, 42.9 m, 33.9 m dan 34.8 m.
2. Tegangan Dinamis yang terjadi akibat VIV paling besar terjadi pada *span* 49.9 m dengan arah in-line $9,59 \times 10^7$ Pa dan arah *in-line* $2,61 \times 10^8$ Pa. Sedangkan, tegangan dinamis yang terjadi paling kecil dengan kondisi *cross flow* pada *span* 14,73 m yaitu $1,03 \times 10^7$ Pa dan untuk arah *in-line* tegangan dinamis paling kecil terjadi pada *span* 11,06 m yaitu $1,16 \times 10^7$ Pa.
3. Hasil dari simulasi Monte Carlo, menunjukkan bahwa semakin panjang *span* semakin tinggi probabilitas kegagalannya. Pada 10000 kali percobaan dihasilkan bahwa *span* dengan panjang 49.9 m, 42.9 m, 33.9 m, 34.8 m dan 31.4 m tidak andal terhadap VIV karna memiliki probabilitas keandalan 0.001 – 0.002. Maka pada 5 titik *span* tersebut diperlukan adanya mitigasi.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang selanjutnya antara lain:

1. Analisis perhitungan tegangan pada *free span* akibat adanya VIV menggunakan *software* dan divalidasi.
2. Dilakukan analisis terhadap struktur *support* yang diperlukan.
3. Melakukan analisis terhadap mitigasi.
4. Melakukan analisis umur kelelahan pipa.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, dkk. (2012). Analisa Risiko dan Langkah Mitigasi pada Offshore Pipeline. Jurnal Teknik ITS: Surabaya.

API Recommended Practice 581. (2008). Risk-Based Inspection Technology. American Petroleum Institute. Washington, D.C.

Det Norske Veritas Recommended Practices F105. (2006). Free Spanning Pipelines. Det Norske Veritas, Norway.

Dou, dkk. (2017). Applications of RBI on Leakage Assessment of Direct Coal Liquefaction Process. Science Direct. Nanjing, China.

Gabbai, R.D. Benaroya, H. (2003). An Overview of Modeling and Experiments of Vortex Induced Vibration of Circular Cylinders. Science Direct. Piscataway, USA.

Guo, B, dkk. (2005). Offshore Pipelines. Gulf Professional Publishing, Burlington. USA.

Kenny, J.P. (1993). Structural Analysis of Pipelines Spans. HSE Books. USA.

Kenny, Shawn. (2018). Element of Managing Risk. Elsevier. Ottawa, Canada.

Lubus, Zulfikar. (2010). Analisa Risiko pada Reducer Pipeline Akibat Internal Corrosion dengan Metode RBI (Risk Based Inspection). Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Rudiyanto, Achmad. (2014). Analisa Risiko Pada Offshore Pipeline Miliki PT. TPPI Tuban Akibat Free Span Dengan Menggunakan Metode Risk Based

Inspection (RBI). Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Shabani, dkk. (2017). Reliability Assesment of Free Spanning Subsea Pipeline. Republic of Iran: CrossMark.

Pamayo, Alan. (2010). Analisa Fatigue Akibat Pengaruh Vortex Induced Vibration pada Free Span Pipa Bawah Laut. Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Purwanti, Ilah. (2009). Analisa Pengaruh Vortex Induced Vibration (VIV) pada Free Span Pipa Bawah Laut Bebas Keandalan. Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Putra, dkk. (2014). Studi Kasus Pengaruh Vortex Induced Vibration pada Free Span Pipa Pertamina Hulu Energi- Offshore North West Java. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Putra, Wahyu Ignas. (2014). Analisa Keandalan Pipa Bawah Laut Akibat Free Spanning dan Rektifikasinya. Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Topalis, dkk. (2016) 3rd Edition of The API 581 RBI Standard and Application Within The French Process Industries. London: DNV GL.

Qathafi, Moamar. dan Sulistijono. (2015). Studi Aplikasi Metode Risk Based Inspection (RBI) Semi-Kuantitatif API 581 pada Production Separator. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN I

Perhitungan Umum Pipa

I. Perhitungan Dimensi Pipa

No.	Description	Simbol	Nilai	Satuan
1	Tebal Dinding Pipa	t_2	0,0159	m
2	Diameter Total Pipa	D_t	0,5990	m
3	Diameter Dalam Pipa	D_i	0,4762	m
4	Diameter Luar Pipa	D	0,5080	
4	Diameter Lapisan Anti Korosi	D_{cc}	0,5190	m
5	Diameter Lapisan Concrete	D_{conc}	0,5990	m
6	Luas Penampang Internal Pipa Baja	A_i	0,2528	m ²
7	Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	0,0291	m ²
8	Luas Penampang Lapisan Anti Korosi	A_{cc}	0,0104	m ²
9	Luas Penampang Lapisan Concrete	A_{conc}	0,0817	m ²
10	Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,0007	m ⁴
11	Momen Inersia Concrete	I_{conc}	0,0015	m ⁴

II. Perhitungan Massa Pipa di Udara

MASSA PIPA DI UDARA				
No.	Description	Simbol	Nilai	Satuan
1	Massa Konten Pipa	M_{fluida}	19,17	kg/m
2	Massa Pipa Baja	M_{st}	193,04	kg/m
3	Massa Lapisan Anti Korosi	M_{cc}	13,13	kg/m
4	Massa Lapisan Concrete	M_{conc}	213,91	kg/m
5	Total Perhitungan Berat Terendam Pipa		439,26	kg/m

BERAT TERENDAM PIPA				
No.	Description	Simbol	Nilai	Satuan
1	Massa Konten Pipa	M_{fluida}	19,17	kg/m
2	Massa Pipa Baja	M_{st}	193,04	kg/m
3	Massa Lapisan Anti Korosi	M_{cc}	13,13	kg/m
4	Massa Lapisan Concrete	M_{conc}	213,91	kg/m
5	Massa Struktur Pipa	M_{str}	420,09	kg/m
			288,96	
7	Massa Bouyancy	F_b	288,96	N/m
8	Berat Terendam Pipa	W_{sub}	1285,00	N/m

IV. Perhitungan Massa Efektif

No.	Panjang Span Aktual (m)	Gap (e) (m)	Rasio (e/Dt)	Ca	Massa Bouyancy (kg/m)	Massa Tambah(kg/m)	Massa Efektif(kg.m)
1	22,147	0,2	0,334	1,279	288,96	369,692	808,95
2	11,063	0,9	1,503	1,000	288,96	288,963	728,22
3	24,387	1,7	2,838	1,000	288,96	288,963	728,22
4	25,171	1,4	2,337	1,000	288,96	288,963	728,22
5	19,781	0,8	1,336	1,000	288,96	288,963	728,22
6	20,811	2	3,339	1,000	288,96	288,963	728,22
7	49,897	2,9	4,841	1,000	288,96	288,963	728,22
8	42,905	2,5	4,174	1,000	288,96	288,963	728,22
9	33,935	0,4	0,668	1,049	288,96	303,052	742,31
10	25,842	1,8	3,005	1,000	288,96	288,963	728,22
11	34,779	0,9	1,503	1,000	288,96	288,963	728,22
12	31,762	0,7	1,169	1,000	288,96	288,963	728,22
13	14,728	0,2	0,334	1,279	288,96	369,692	808,95
14	18,513	0,4	0,668	1,049	288,96	303,052	742,31
15	28,035	0,8	1,336	1,000	288,96	288,963	728,22

LAMPIRAN II

Perhitungan Arus dan Gelombang

I. Parameter Perhitungan Kecepatan Arus

Parameter	Notasi	Nilai (10 Tahun)	Nilai (100 Tahun)	Satuan
Kedalaman	h	106,5	106,5	m
Kecepatan Arus dan Bottom	$U(z)$	0,618	0,694	m/s

Parameter Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa				
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan	
Diameter Total Pipa	D_t	0,599	m	
Diameter Luar Pipa Baja	D	0,508	m	
Arah Aliran Arus		90	°	
Seabed Roughness	Z_0	0,00001	m	

II. Perhitungan Kecepatan Arus Tegak Lurus dengan Pipa

Panjang Span Aktual (m)	Gap(m)	U(zr) m/s 10 Tahun	U(zr) m/s 100 Tahun	Faktor Reduksi	Elevasi di Atas Dasar Laut (m)	Parameter Kekasaran Dasar Laut (m)	Tinggi Referensi (m)	Kec. Arus (10 Tahun) m/s	Kec. Arus (100 Tahun) m/s	Ln (z)	Ln (zr)	Ln (z0)
22,15	0,2	0,618	0,694	1	0,500	0,000	1,000	0,583	0,654	-0,694	0,000	-12,165
11,06	0,9	0,618	0,694	1	1,200	0,000	1,000	0,627	0,704	0,182	0,000	-12,165
24,39	1,7	0,618	0,694	1	2,000	0,000	1,000	0,653	0,734	0,693	0,000	-12,165
25,17	1,4	0,618	0,694	1	1,700	0,000	1,000	0,645	0,724	0,530	0,000	-12,165
19,78	0,8	0,618	0,694	1	1,100	0,000	1,000	0,623	0,699	0,095	0,000	-12,165
20,81	2	0,618	0,694	1	2,300	0,000	1,000	0,663	0,744	0,833	0,000	-11,513
49,90	2,9	0,618	0,694	1	3,200	0,000	1,000	0,680	0,764	1,163	0,000	-11,513
42,90	2,5	0,618	0,694	1	2,800	0,000	1,000	0,673	0,756	1,029	0,000	-11,513
33,94	0,4	0,618	0,694	1	0,700	0,000	1,000	0,599	0,672	-0,357	0,000	-11,513
25,84	1,8	0,618	0,694	1	2,100	0,000	1,000	0,658	0,739	0,742	0,000	-11,513
34,78	0,9	0,618	0,694	1	1,200	0,000	1,000	0,628	0,705	0,182	0,000	-11,513
31,76	0,7	0,618	0,694	1	1,000	0,000	1,000	0,618	0,694	-0,001	0,000	-11,513
14,73	0,2	0,618	0,694	1	0,500	0,000	1,000	0,581	0,652	-0,694	0,000	-11,513

18,51	0,4	0,618	0,694	1	0,700	0,000	1,000	0,599	0,672	-0,357	0,000	-11,513
28,04	0,8	0,618	0,694	1	1,100	0,000	1,000	0,623	0,700	0,095	0,000	-11,513

Data Gelombang

Parameter	Notasi	Nilai (10 Tahun)	Nilai (100 Tahun)	Satuan
Kedalaman	h	106,5	106,5	m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	3,9	5,09	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	8,05	8,87	s

Parameter JONSWAP

Parameter	Notasi	Nilai (10 Tahun)	Nilai (100 Tahun)	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	3,9	5,09	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	8,05	8,87	s
Periode Gelombang Signifikan	ω_s	1,61	1,23	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9,8	9,8	m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	7,24	7,93	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0,87	0,79	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	3,71	3,12	
Peakedness Parameter	γ	4,39	5,00	
Konstanta Generalized Philips	α	0,02	0,02	

LN Peakedness Parameter	$LN(Y)$	1,48	1,61	
Parameter Spektral	σ	0,09	0,09	

III. Parameter Perhitungan Arus
Akibat Gelombang

IV. Iterasi Angka Gelombang

ANGKA GELOMBANG 10 TAHUN

Kw Asumsi	h	g	ω	Kwh	TANH Kwh	COTH Kwh	k	error	SINH Kh	COSH($k*(D+e)$)
0,02	106,50	9,81	0,78	1,60	0,92	1,09	0,07	0,78	2,4	1,00
0,07	106,50	9,81	0,78	7,17	1,00	1,00	0,06	0,09	7,E+02	1,00
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,01
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,01
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,00
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,01
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,02
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,02
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,00
0,06	106,50	9,81	0,78	6,61	1,00	1,00	0,06	0,00	370,2	1,01

ANGKA GELOMBANG 100 TAHUN

Kw Asumsi	h	g	ω	Kwh	TANH Kwh	COTH Kwh	k	error	SINH Kh
0,10	106,50	9,81	0,71	10,65	1,00	1,00	0,05	0,96	21096,30
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,44
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46

0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46
0,05	106,50	9,81	0,71	5,44	1,00	1,00	0,05	0,00	115,46

V. Perhitungan Spektrum JONSWAP (10 Tahun)

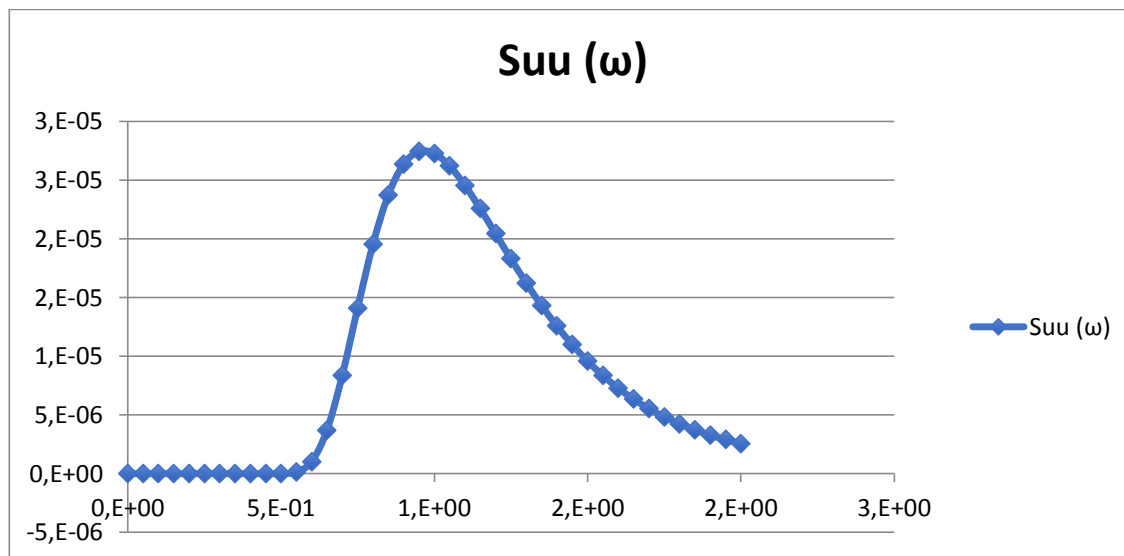
ω	σ	Snn (ω)	G(ω)	γ	G(ω) ²	Suu (ω)	FS	M0	M1	M2	M4
0,E+00	7,E-02	0,E+00	0,E+00	4,E+00	0,E+00	0,E+00	1,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
5,E-02	7,E-02	0,E+00	1,E-04	4,E+00	2,E-08	0,E+00	4,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
1,E-01	7,E-02	0,E+00	3,E-04	4,E+00	7,E-08	0,E+00	2,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
2,E-01	7,E-02	0,E+00	4,E-04	4,E+00	2,E-07	0,E+00	4,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
2,E-01	7,E-02	1,E-188	5,E-04	4,E+00	3,E-07	4,E-195	2,E+00	8,E-195	2,E-195	3,E-196	1,E-197
3,E-01	7,E-02	1,E-75	7,E-04	4,E+00	5,E-07	5,E-82	4,E+00	2,E-81	5,E-82	1,E-82	8,E-84
3,E-01	7,E-02	3,E-35	8,E-04	4,E+00	7,E-07	2,E-41	2,E+00	3,E-41	1,E-41	3,E-42	3,E-43
4,E-01	7,E-02	4,E-18	9,E-04	4,E+00	9,E-07	3,E-24	4,E+00	1,E-23	5,E-24	2,E-24	2,E-25
4,E-01	7,E-02	6,E-10	1,E-03	4,E+00	1,E-06	7,E-16	2,E+00	1,E-15	6,E-16	2,E-16	4,E-17

ω	σ	Snn (ω)	G(ω)	Y	G(ω) ²	Suu (ω)	FS	M0	M1	M2	M4
5,E-01	7,E-02	1,E-05	1,E-03	4,E+00	1,E-06	2,E-11	4,E+00	7,E-11	3,E-11	1,E-11	3,E-12
5,E-01	7,E-02	3,E-03	1,E-03	4,E+00	2,E-06	5,E-09	2,E+00	9,E-09	5,E-09	2,E-09	6,E-10
6,E-01	7,E-02	6,E-02	1,E-03	4,E+00	2,E-06	1,E-07	4,E+00	5,E-07	3,E-07	2,E-07	5,E-08
6,E-01	7,E-02	4,E-01	2,E-03	4,E+00	3,E-06	1,E-06	2,E+00	2,E-06	1,E-06	7,E-07	3,E-07
7,E-01	7,E-02	1,E+00	2,E-03	4,E+00	3,E-06	4,E-06	4,E+00	1,E-05	1,E-05	6,E-06	3,E-06
7,E-01	7,E-02	2,E+00	2,E-03	4,E+00	4,E-06	8,E-06	2,E+00	2,E-05	1,E-05	8,E-06	4,E-06
8,E-01	7,E-02	3,E+00	2,E-03	4,E+00	4,E-06	1,E-05	4,E+00	6,E-05	4,E-05	3,E-05	2,E-05
8,E-01	7,E-02	4,E+00	2,E-03	4,E+00	5,E-06	2,E-05	2,E+00	4,E-05	3,E-05	2,E-05	2,E-05
9,E-01	7,E-02	5,E+00	2,E-03	4,E+00	5,E-06	2,E-05	4,E+00	9,E-05	8,E-05	7,E-05	5,E-05
9,E-01	9,E-02	4,E+00	2,E-03	4,E+00	6,E-06	3,E-05	2,E+00	5,E-05	5,E-05	4,E-05	3,E-05
1,E+00	9,E-02	4,E+00	3,E-03	4,E+00	7,E-06	3,E-05	4,E+00	1,E-04	1,E-04	1,E-04	9,E-05
1,E+00	9,E-02	4,E+00	3,E-03	4,E+00	7,E-06	3,E-05	2,E+00	5,E-05	5,E-05	5,E-05	5,E-05
1,E+00	9,E-02	3,E+00	3,E-03	4,E+00	8,E-06	3,E-05	4,E+00	1,E-04	1,E-04	1,E-04	1,E-04
1,E+00	9,E-02	3,E+00	3,E-03	4,E+00	9,E-06	2,E-05	2,E+00	5,E-05	5,E-05	6,E-05	7,E-05
1,E+00	9,E-02	2,E+00	3,E-03	4,E+00	1,E-05	2,E-05	4,E+00	9,E-05	1,E-04	1,E-04	2,E-04
1,E+00	9,E-02	2,E+00	3,E-03	4,E+00	1,E-05	2,E-05	2,E+00	4,E-05	5,E-05	6,E-05	8,E-05
1,E+00	9,E-02	2,E+00	3,E-03	4,E+00	1,E-05	2,E-05	4,E+00	7,E-05	9,E-05	1,E-04	2,E-04
1,E+00	9,E-02	1,E+00	4,E-03	4,E+00	1,E-05	2,E-05	2,E+00	3,E-05	4,E-05	5,E-05	9,E-05

ω	σ	Snn (ω)	G(ω)	Y	G(ω) ²	Suu (ω)	FS	M0	M1	M2	M4
1,E+00	9,E-02	1,E+00	4,E-03	4,E+00	1,E-05	1,E-05	4,E+00	6,E-05	8,E-05	1,E-04	2,E-04
1,E+00	9,E-02	9,E-01	4,E-03	4,E+00	1,E-05	1,E-05	2,E+00	3,E-05	4,E-05	5,E-05	1,E-04
1,E+00	9,E-02	7,E-01	4,E-03	4,E+00	2,E-05	1,E-05	4,E+00	4,E-05	6,E-05	9,E-05	2,E-04
2,E+00	9,E-02	6,E-01	4,E-03	4,E+00	2,E-05	1,E-05	2,E+00	2,E-05	3,E-05	4,E-05	1,E-04
2,E+00	9,E-02	5,E-01	4,E-03	4,E+00	2,E-05	8,E-06	4,E+00	3,E-05	5,E-05	8,E-05	2,E-04
2,E+00	9,E-02	4,E-01	4,E-03	4,E+00	2,E-05	7,E-06	2,E+00	1,E-05	2,E-05	4,E-05	1,E-04
2,E+00	9,E-02	3,E-01	4,E-03	4,E+00	2,E-05	6,E-06	4,E+00	3,E-05	4,E-05	7,E-05	2,E-04
2,E+00	9,E-02	3,E-01	5,E-03	4,E+00	2,E-05	6,E-06	2,E+00	1,E-05	2,E-05	3,E-05	9,E-05
2,E+00	9,E-02	2,E-01	5,E-03	4,E+00	2,E-05	5,E-06	4,E+00	2,E-05	3,E-05	6,E-05	2,E-04
2,E+00	9,E-02	2,E-01	5,E-03	4,E+00	2,E-05	4,E-06	2,E+00	8,E-06	2,E-05	3,E-05	9,E-05
2,E+00	9,E-02	1,E-01	5,E-03	4,E+00	2,E-05	4,E-06	4,E+00	1,E-05	3,E-05	5,E-05	2,E-04
2,E+00	9,E-02	1,E-01	5,E-03	4,E+00	3,E-05	3,E-06	2,E+00	7,E-06	1,E-05	2,E-05	9,E-05
2,E+00	9,E-02	1,E-01	5,E-03	4,E+00	3,E-05	3,E-06	4,E+00	1,E-05	2,E-05	4,E-05	2,E-04
2,E+00	9,E-02	9,E-02	5,E-03	4,E+00	3,E-05	3,E-06	1,E+00	3,E-06	5,E-06	1,E-05	4,E-05
							SUM	0,00113	0,00129	0,00158	0,00287

Momen Spektra Gelombang	
$M0 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M0$	1,9E-05
$M1 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M1$	2,2E-05
$M2 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M2$	2,6E-05
$M4 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M4$	4,8E-05

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang			
Parameter	Notasi	10 Tahun	Satuan
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	U_s	0,067119838	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	5,295276455	s
Reduction Factor	R_D	0,91	-
Kecepatan Arus Signifikan Normal pada Pipa	U_w	0,061079053	m/s



VI. Perhitungan Spektrum JONSWAP (100 Tahun)

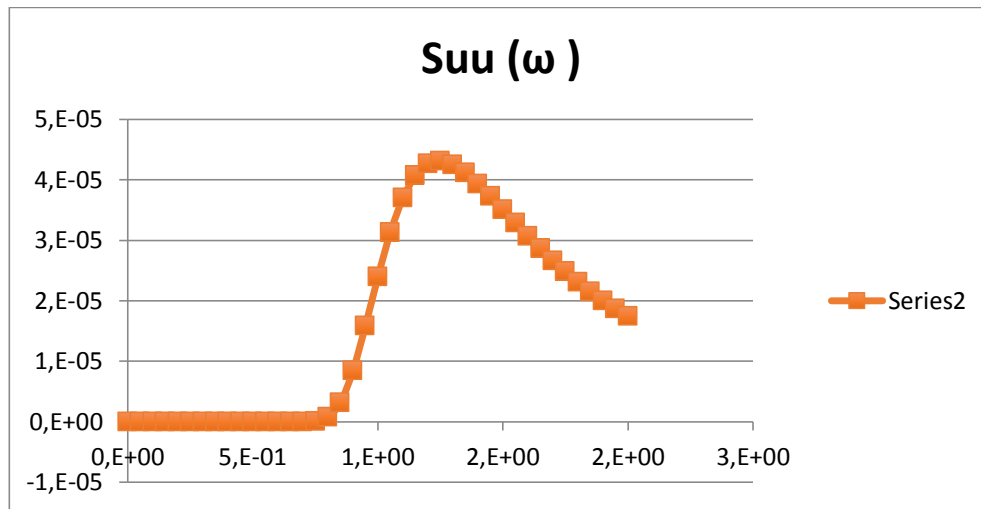
ω	σ	$S_{nn}(\omega)$	$G(\omega)$	Y	$G(\omega)^2$	$S_{uu}(\omega)$	FS	M0	M1	M2	M4
0,E+00	7,E-02	0,E+00	0,E+00	5,E+00	0,E+00	0,E+00	1,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
5,E-02	7,E-02	0,E+00	4,E-04	5,E+00	2,E-07	0,E+00	4,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
1,E-01	7,E-02	0,E+00	9,E-04	5,E+00	8,E-07	0,E+00	2,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
2,E-01	7,E-02	0,E+00	1,E-03	5,E+00	2,E-06	0,E+00	4,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
2,E-01	7,E-02	0,E+00	2,E-03	5,E+00	3,E-06	0,E+00	2,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
3,E-01	7,E-02	0,E+00	2,E-03	5,E+00	5,E-06	0,E+00	4,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
3,E-01	7,E-02	0,E+00	3,E-03	5,E+00	7,E-06	0,E+00	2,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00

ω	σ	Snn (ω)	G(ω)	Y	G(ω) ²	Suu (ω)	FS	M0	M1	M2	M4
4,E-01	7,E-02	1,E-164	3,E-03	5,E+00	9,E-06	1,E-169	4,E+00	5,E-169	2,E-169	6,E-170	8,E-171
4,E-01	7,E-02	2,E-85	3,E-03	5,E+00	1,E-05	3,E-90	2,E+00	5,E-90	2,E-90	8,E-91	1,E-91
5,E-01	7,E-02	2,E-47	4,E-03	5,E+00	2,E-05	4,E-52	4,E+00	1,E-51	7,E-52	3,E-52	6,E-53
5,E-01	7,E-02	1,E-27	4,E-03	5,E+00	2,E-05	2,E-32	2,E+00	4,E-32	2,E-32	1,E-32	3,E-33
6,E-01	7,E-02	7,E-17	5,E-03	5,E+00	2,E-05	2,E-21	4,E+00	6,E-21	3,E-21	2,E-21	6,E-22
6,E-01	7,E-02	1,E-10	5,E-03	5,E+00	3,E-05	3,E-15	2,E+00	5,E-15	3,E-15	2,E-15	7,E-16
7,E-01	7,E-02	5,E-07	6,E-03	5,E+00	3,E-05	1,E-11	4,E+00	6,E-11	4,E-11	2,E-11	1,E-11
7,E-01	7,E-02	8,E-05	6,E-03	5,E+00	4,E-05	3,E-09	2,E+00	6,E-09	4,E-09	3,E-09	1,E-09
8,E-01	7,E-02	2,E-03	6,E-03	5,E+00	4,E-05	9,E-08	4,E+00	3,E-07	3,E-07	2,E-07	1,E-07
8,E-01	7,E-02	2,E-02	7,E-03	5,E+00	5,E-05	8,E-07	2,E+00	2,E-06	1,E-06	1,E-06	6,E-07
9,E-01	7,E-02	6,E-02	7,E-03	5,E+00	5,E-05	3,E-06	4,E+00	1,E-05	1,E-05	9,E-06	7,E-06
9,E-01	9,E-02	1,E-01	8,E-03	5,E+00	6,E-05	8,E-06	2,E+00	2,E-05	2,E-05	1,E-05	1,E-05
1,E+00	9,E-02	2,E-01	8,E-03	5,E+00	7,E-05	2,E-05	4,E+00	6,E-05	6,E-05	6,E-05	5,E-05
1,E+00	9,E-02	3,E-01	9,E-03	5,E+00	8,E-05	2,E-05	2,E+00	5,E-05	5,E-05	5,E-05	5,E-05
1,E+00	9,E-02	4,E-01	9,E-03	5,E+00	8,E-05	3,E-05	4,E+00	1,E-04	1,E-04	1,E-04	2,E-04
1,E+00	9,E-02	4,E-01	1,E-02	5,E+00	9,E-05	4,E-05	2,E+00	7,E-05	8,E-05	9,E-05	1,E-04
1,E+00	9,E-02	4,E-01	1,E-02	5,E+00	1,E-04	4,E-05	4,E+00	2,E-04	2,E-04	2,E-04	3,E-04
1,E+00	9,E-02	4,E-01	1,E-02	5,E+00	1,E-04	4,E-05	2,E+00	9,E-05	1,E-04	1,E-04	2,E-04

ω	σ	Snn (ω)	G(ω)	Y	G(ω) ²	Suu (ω)	FS	M0	M1	M2	M4
1,E+00	9,E-02	4,E-01	1,E-02	5,E+00	1,E-04	4,E-05	4,E+00	2,E-04	2,E-04	3,E-04	4,E-04
1,E+00	9,E-02	3,E-01	1,E-02	5,E+00	1,E-04	4,E-05	2,E+00	9,E-05	1,E-04	1,E-04	2,E-04
1,E+00	9,E-02	3,E-01	1,E-02	5,E+00	1,E-04	4,E-05	4,E+00	2,E-04	2,E-04	3,E-04	5,E-04
1,E+00	9,E-02	3,E-01	1,E-02	5,E+00	1,E-04	4,E-05	2,E+00	8,E-05	1,E-04	2,E-04	3,E-04
1,E+00	9,E-02	2,E-01	1,E-02	5,E+00	2,E-04	4,E-05	4,E+00	1,E-04	2,E-04	3,E-04	7,E-04
2,E+00	9,E-02	2,E-01	1,E-02	5,E+00	2,E-04	4,E-05	2,E+00	7,E-05	1,E-04	2,E-04	4,E-04
2,E+00	9,E-02	2,E-01	1,E-02	5,E+00	2,E-04	3,E-05	4,E+00	1,E-04	2,E-04	3,E-04	8,E-04
2,E+00	9,E-02	2,E-01	1,E-02	5,E+00	2,E-04	3,E-05	2,E+00	6,E-05	1,E-04	2,E-04	4,E-04
2,E+00	9,E-02	1,E-01	1,E-02	5,E+00	2,E-04	3,E-05	4,E+00	1,E-04	2,E-04	3,E-04	8,E-04
2,E+00	9,E-02	1,E-01	1,E-02	5,E+00	2,E-04	3,E-05	2,E+00	5,E-05	9,E-05	2,E-04	4,E-04
2,E+00	9,E-02	1,E-01	2,E-02	5,E+00	2,E-04	2,E-05	4,E+00	1,E-04	2,E-04	3,E-04	9,E-04
2,E+00	9,E-02	1,E-01	2,E-02	5,E+00	2,E-04	2,E-05	2,E+00	5,E-05	8,E-05	1,E-04	5,E-04
2,E+00	9,E-02	8,E-02	2,E-02	5,E+00	3,E-04	2,E-05	4,E+00	9,E-05	2,E-04	3,E-04	1,E-03
2,E+00	9,E-02	7,E-02	2,E-02	5,E+00	3,E-04	2,E-05	2,E+00	4,E-05	8,E-05	1,E-04	5,E-04
2,E+00	9,E-02	7,E-02	2,E-02	5,E+00	3,E-04	2,E-05	4,E+00	7,E-05	1,E-04	3,E-04	1,E-03
2,E+00	9,E-02	6,E-02	2,E-02	5,E+00	3,E-04	2,E-05	1,E+00	2,E-05	3,E-05	7,E-05	3,E-04
							SUM	2,E-03	3,E-03	4,E-03	1,E-02

Momen Spektra Gelombang	
$M0 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M0$	3,4,E-05
$M1 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M1$	4,8,E-05
$M2 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M2$	7,0,E-05
$M4 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M4$	1,7,E-04

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e=0,5			
Parameter	Notasi	100 Tahun	Satuan
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	U_s	9,0,E-02	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4,4,E+00	s
Reduction Factor	R_D	8,7,E-01	-
Kecepatan Arus Signifikan Normal pada Pipa	U_w	7,8,E-02	m/s



VI. Perhitungan Kecepatan Arus Efektif

Panjang Span	Gap (e)	Uc (10 Tahun)	Uc (100 Tahun)	Uw (10 Tahun)	Uw (100 Tahun)	Kec. Arus (10 Tahun) m/s	Kec. Arus (100 Tahun) m/s	R_c
22,147	0,200	0,607	0,910	0,067	0,090	0,674	1,001	1,000
11,063	0,900	0,653	0,868	0,067	0,090	0,720	0,958	1,000
24,387	1,700	0,680	0,916	0,067	0,090	0,747	1,007	1,000
25,171	1,400	0,672	0,918	0,067	0,090	0,739	1,009	1,000
19,781	0,800	0,648	0,903	0,067	0,090	0,716	0,994	1,000

20,811	2,000	0,688	0,907	0,067	0,090	0,755	0,997	1,000
49,897	2,900	0,705	0,961	0,067	0,090	0,772	1,051	1,000
42,905	2,500	0,698	0,951	0,067	0,090	0,765	1,041	1,000
33,935	0,400	0,625	0,937	0,067	0,090	0,692	1,027	1,000
25,842	1,800	0,683	0,920	0,067	0,090	0,750	1,010	1,000
34,779	0,900	0,653	0,938	0,067	0,090	0,720	1,028	1,000
31,762	0,700	0,643	0,933	0,067	0,090	0,711	1,023	1,000
14,728	0,200	0,607	0,885	0,067	0,090	0,674	0,976	1,000
18,513	0,400	0,625	0,899	0,067	0,090	0,692	0,990	1,000
28,035	0,800	0,648	0,925	0,067	0,090	0,716	1,015	1,000

LAMPIRAN III

Perhitungan Parameter VIV

I. PARAMETER VIV

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1024,5	kg/m ³
Stability Parameter Safety Factor	λ_k	1,150	-
Soil Damping	ζ_{soil}	0,010	-
Hydrodynamic Damping	ζ_h	0,000	-
Structural Damping	ζ_{str}	0,005	-
Kekasaran Permukaan Pipa	K	0,003	m
Diameter Total Pipa	D_I	0,599	m
Rasio k/Di	K/DI	0,005	-
Frek. Gelombang Signifikan (10 Tahun)	ω_s	1,610	rad/s
Frek. Gelombang Signifikan (100 Tahun)	ω_s	1,234	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	V_k	0,000	m ² /s

II. Perhitungan Keulegan Carpenter

L	e	Me	Uc (10 Tahun)	Uc (100 Tahun)	Uw (10 Tahun)	Uw (100 Tahun)	Kc (10 Tahun)	Kc (100 Tahun)
22,15	0,20	808,95	0,61	0,91	0,07	0,09	0,59	0,49
11,06	0,90	728,22	0,65	0,87	0,07	0,09	0,59	0,49
24,39	1,70	728,22	0,68	0,92	0,07	0,09	0,59	0,49
25,17	1,40	728,22	0,67	0,92	0,07	0,09	0,59	0,49
19,78	0,80	728,22	0,65	0,90	0,07	0,09	0,59	0,49
20,81	2,00	728,22	0,69	0,91	0,07	0,09	0,59	0,49
49,90	2,90	728,22	0,70	0,96	0,07	0,09	0,59	0,49
42,90	2,50	728,22	0,70	0,95	0,07	0,09	0,59	0,49
33,94	0,40	742,31	0,62	0,94	0,07	0,09	0,59	0,49
25,84	1,80	728,22	0,68	0,92	0,07	0,09	0,59	0,49
34,78	0,90	728,22	0,65	0,94	0,07	0,09	0,59	0,49
31,76	0,70	728,22	0,64	0,93	0,07	0,09	0,59	0,49
14,73	0,20	808,95	0,61	0,89	0,07	0,09	0,59	0,49
18,51	0,40	742,31	0,62	0,90	0,07	0,09	0,59	0,49
28,04	0,80	728,22	0,65	0,92	0,07	0,09	0,59	0,49

III. Perhitungan Reynolds Number dan Parameter Stabilitas

L	e	Re (10 Tahun)	Re (100 Tahun)	Ksd	Ks
22,15	0,20	349458,79	524370,81	0,29	0,33
11,06	0,90	376147,83	499959,70	0,26	0,30
24,39	1,70	391715,28	527781,55	0,26	0,30
25,17	1,40	386762,77	528902,45	0,26	0,30
19,78	0,80	373495,87	520375,80	0,26	0,30
20,81	2,00	395974,14	522169,45	0,26	0,30
49,90	2,90	406036,85	553228,26	0,26	0,30
42,90	2,50	401968,12	547849,00	0,26	0,30
33,94	0,40	359718,17	539505,24	0,26	0,30
25,84	1,80	393202,04	529834,01	0,26	0,30
34,78	0,90	376147,83	540378,73	0,26	0,30
31,76	0,70	370590,85	537153,31	0,26	0,30
14,73	0,20	349458,79	509982,16	0,29	0,33
18,51	0,40	359718,17	518036,74	0,26	0,30
28,04	0,80	373495,87	532722,92	0,26	0,30

IV. Perhitungan Reduced Velocity

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
In-Line Onset Safety Factor	$\gamma_{on, IL}$	1,1	-
Cross Flow Onset Safety Factor	$\gamma_{on, CF}$	1,2	-

REDUCED VELOCITY ONSET

Panjang Span	Rasio e/dt	$\Psi_{prox, onset}$	$\Psi_{trench, onset}$	VR CF Onset	Ksd	VR IL Onset	VR
22,15	0,3	0,9	1,0	2,2	0,3	0,9	2,061
11,06	1,5	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	1,974
24,39	2,8	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,073
25,17	2,3	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,077
19,78	1,3	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,047
20,81	3,3	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,053
49,90	4,8	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,164
42,90	4,2	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,145
33,94	0,7	1,0	1,0	2,4	0,3	0,9	2,115
25,84	3,0	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,081

34,78	1,5	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,118
31,76	1,2	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,107
14,73	0,3	0,9	1,0	2,2	0,3	0,9	2,010
18,51	0,7	1,0	1,0	2,4	0,3	0,9	2,038
28,04	1,3	1,0	1,0	2,5	0,3	0,9	2,091

LAMPIRAN IV

Perhitungan Beban Hidrodinamis

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1022	kg/m ³
Diameter Total Pipa	D_I	0,599	m
Koefisien Lift	C_L	0,7	-
k/d	k/d	0,00556483	

I. Perhitungan Gaya Lift

L	e	Re(10 Tahun)	Re (100 Tahun)	CL (10 Tahun)	CL (100 Tahun)	FL (10 Tahun)	FL (100 Tahun)
22,15	0,20	349458,79	524370,81	0,7	0,7	97,294	214,540
11,06	0,90	376147,83	499959,70	0,7	0,7	111,135	196,751
24,39	1,70	391715,28	527781,55	0,7	0,7	119,633	217,086
25,17	1,40	386762,77	528902,45	0,7	0,7	116,895	217,927
19,78	0,80	373495,87	520375,80	0,7	0,7	109,718	211,576
20,81	2,00	395974,14	522169,45	0,7	0,7	122,012	212,904
49,90	2,90	406036,85	553228,26	0,7	0,7	127,727	236,562
42,90	2,50	401968,12	547849,00	0,7	0,7	125,401	232,375
33,94	0,40	359718,17	539505,24	0,7	0,7	102,505	225,955

25,84	1,80	393202,04	529834,01	0,7	0,7	120,461	218,626
34,78	0,90	376147,83	540378,73	0,7	0,7	111,135	226,623
31,76	0,70	370590,85	537153,31	0,7	0,7	108,177	224,162
14,73	0,20	349458,79	509982,16	0,7	0,7	97,294	203,961
18,51	0,40	359718,17	518036,74	0,7	0,7	102,505	209,850
28,04	0,80	373495,87	532722,92	0,7	0,7	109,718	220,803

II. Perhitungan Koefisien dan Gaya Drag

L(m)	Uc	Tu	KC	Ψ_{KC}	Ψ_{proxi}	e/D	Ψ_{trench}	Ψ_{VIV}	CD0	CD	FD(N/m)
22,15	1,00	8,05	13,45	1,00	1,09	0,33	1,00	1,08	1,00	1,18	601,94
11,06	0,96	8,05	12,88	1,00	1,00	1,50	1,00	1,36	1,00	1,36	637,31
24,39	1,01	8,05	13,53	1,00	1,00	2,84	1,00	1,36	1,00	1,36	703,18
25,17	1,01	8,05	13,55	1,00	1,00	2,34	1,00	1,36	1,00	1,36	705,90
19,78	0,99	8,05	13,35	1,00	1,00	1,34	1,00	1,36	1,00	1,36	685,33
20,81	1,00	8,05	13,40	1,00	1,00	3,34	1,00	1,36	1,00	1,36	689,63
49,90	1,05	8,05	14,12	1,00	1,00	4,84	1,00	1,36	1,00	1,36	766,26
42,90	1,04	8,05	14,00	1,00	1,00	4,17	1,00	1,36	1,00	1,36	752,70
33,94	1,03	8,05	13,80	1,00	1,02	0,67	1,00	1,32	1,00	1,34	720,19
25,84	1,01	8,05	13,58	1,00	1,00	3,01	1,00	1,36	1,00	1,36	708,17
34,78	1,03	8,05	13,82	1,00	1,00	1,50	1,00	1,36	1,00	1,36	734,07
31,76	1,02	8,05	13,75	1,00	1,00	1,17	1,00	1,36	1,00	1,36	726,10
14,73	0,98	8,05	13,11	1,00	1,09	0,33	1,00	1,08	1,00	1,18	572,26
18,51	0,99	8,05	13,30	1,00	1,02	0,67	1,00	1,32	1,00	1,34	668,86
28,04	1,02	8,05	13,64	1,00	1,00	1,34	1,00	1,36	1,00	1,36	715,22

LAMPIRAN V

Perhitungan Frekuensi Natural dan Vortex

Shedding

I. Perhitungan Frekuensi Natural

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta Empiris	k_C	0,33	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,00074	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	0,00153	m ⁴
Young's Modulus Pipa Baja	E_{st}	2,07E+11	Pa
Kekuatan Material Selimut Beton	f_{cn}	45	Pa

Concrete Stiffness Factor

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Young's Modulus Selimut Beton	E_{conc}	31330,24234	Pa
sConcrete Stiffness Factor	CSF	4,33699E-06	-

Frekuensi Natural Cross Flow

Panjang Span (m)	Massa Efektif (kg.m)	Critical Buckling Load (P_{cr})	Defleksi (δ)	Frekuensi Natural Cross Flow (Hz)
22,15	808,95	12390638,45	5,32,E-03	3,20
11,06	728,22	49654673,72	3,27,E-04	13,41

Panjang Span (m)	Massa Efektif (kg.m)	Critical Buckling Load (P_{cr})	Defleksi (δ)	Frekuensi Natural Cross Flow (Hz)
24,39	728,22	10218969,42	7,86,E-03	2,78
25,17	728,22	9592380,15	8,93,E-03	2,62
19,78	728,22	15532948,44	3,37,E-03	4,22
20,81	728,22	14033415,83	4,14,E-03	3,81
49,90	728,22	2441091,54	1,49,E-01	0,69
42,90	728,22	3301679,74	7,91,E-02	0,92
33,94	742,31	5277687,43	3,01,E-02	1,44
25,84	728,22	9101126,18	9,94,E-03	2,48
34,78	728,22	5024580,08	3,33,E-02	1,39
31,76	728,22	6024714,58	2,30,E-02	1,65
14,73	808,95	28019602,90	1,03,E-03	7,19
18,51	742,31	17733812,04	2,58,E-03	4,76
28,04	728,22	7732778,69	1,38,E-02	2,11

Panjang Span (m)	Massa Efektif (kg.m)	Critical Buckling Load (P_{cr})	Defleksi (δ)	Frekuensi Natural In Line (Hz)
22,15	808,95	12390638,45	2,49,E-03	3,20
11,06	728,22	49654673,72	1,62,E-04	13,41
24,39	728,22	10218969,42	4,30,E-03	2,78
25,17	728,22	9592380,15	4,91,E-03	2,62
19,78	728,22	15532948,44	1,80,E-03	4,22
20,81	728,22	14033415,83	2,22,E-03	3,81
49,90	728,22	2441091,54	8,86,E-02	0,69
42,90	728,22	3301679,74	4,63,E-02	0,92
33,94	742,31	5277687,43	1,69,E-02	1,44
25,84	728,22	9101126,18	5,48,E-03	2,48
34,78	728,22	5024580,08	1,90,E-02	1,39
31,76	728,22	6024714,58	1,30,E-02	1,65
14,73	808,95	28019602,90	4,59,E-04	7,19
18,51	742,31	17733812,04	1,35,E-03	4,76
28,04	728,22	7732778,69	7,70,E-03	2,11

II. Perhitungan Vortex Shedding

Panjang Span (m)	Massa Efektif (kg.m)	Vortex Shedding(Hz)
22,147	808,949	0,351
11,063	728,220	0,336
24,387	728,220	0,353
25,171	728,220	0,354
19,781	728,220	0,349
20,811	728,220	0,350
49,897	728,220	0,369
42,905	728,220	0,365
33,935	742,309	0,360
25,842	728,220	0,354
34,779	728,220	0,361
31,762	728,220	0,359
14,728	808,949	0,342
18,513	742,309	0,347
28,035	728,220	0,356

I. Perhitungan Panjang Span Kritis

Panjang Span	Massa Efektif	Frekuensi Natural CF	Frekuensi Natural IL	Reduced Velocity CF	Reduced Velocity IL	Panjang Span Kritis CF	Panjang Span Kritis IL
22,147	808,949	3,197	3,197	2,209	1,269	38,084	46,115
11,063	728,220	13,411	13,411	2,500	1,974	40,094	96,963
24,387	728,220	2,785	2,784	2,500	2,073	39,289	44,183
25,171	728,220	2,616	2,616	2,500	2,077	39,540	42,822
19,781	728,220	4,216	4,216	2,500	2,047	40,236	54,369
20,811	728,220	3,812	3,812	2,500	2,053	39,078	51,698
49,897	728,220	0,692	0,690	2,500	2,164	38,590	21,986
42,905	728,220	0,922	0,921	2,500	2,145	38,785	25,406
33,935	742,309	1,439	1,439	2,417	2,115	40,124	31,612
25,842	728,220	2,483	2,483	2,500	2,081	39,215	41,724
34,779	728,220	1,385	1,385	2,500	2,118	40,094	31,158
31,762	728,220	1,654	1,654	2,500	2,107	40,394	34,055
14,728	808,949	7,193	7,193	2,209	2,010	38,084	69,170
18,513	742,309	4,764	4,764	2,417	2,038	40,124	57,513
28,035	728,220	2,115	2,115	2,500	2,091	40,236	38,502

LAMPIRAN VI
Screening Kriteria Free Span

I. Screening Kriteria L/D

No.	KP (km)	Gap(m)	Length (m)	L/D	LD>30
1	0,176-0,199	0,2	22,1	36,97	YES
2	0,221-0,233	0,9	11,1	18,47	NO
3	0,248-0,274	1,7	24,4	40,71	YES
4	0,298-0,326	1,4	25,2	42,02	YES
5	0,441-0,464	0,8	19,8	33,02	YES
6	0,493-0,515	2	20,8	34,74	YES
7	0,560-0,615	2,9	49,9	83,30	YES
8	0,634-0,679	2,5	42,9	71,63	YES
9	0,715-0,750	0,4	33,9	56,65	YES
10	0,762-0,789	1,8	25,8	43,14	YES
11	0,825-0,862	0,9	34,8	58,06	YES
12	0,935-0,969	0,7	31,8	53,02	YES
13	0,982-0,998	0,2	14,7	24,59	NO
14	1,087-1,106	0,4	18,5	30,91	YES
15	1,257-1,287	0,8	28,0	46,80	YES

II. Screening Kriteria Frekuensi Natural dan Vortex Shedding

Panjang Span	Vortex Shedding	0.7 Frekuensi Natural CF	Screening
22,147	0,351	2,238	TIDAK KRITIS
11,063	0,336	9,388	TIDAK KRITIS
24,387	0,353	1,949	TIDAK KRITIS
25,171	0,354	1,831	TIDAK KRITIS
19,781	0,349	2,951	TIDAK KRITIS
20,811	0,350	2,669	TIDAK KRITIS
49,897	0,369	0,484	TIDAK KRITIS
42,905	0,365	0,645	TIDAK KRITIS
33,935	0,360	1,008	TIDAK KRITIS
25,842	0,354	1,738	TIDAK KRITIS
34,779	0,361	0,970	TIDAK KRITIS
31,762	0,359	1,158	TIDAK KRITIS
14,728	0,342	5,035	TIDAK KRITIS
18,513	0,347	3,335	TIDAK KRITIS
28,035	0,356	1,480	TIDAK KRITIS

Panjang Span	Vortex Shedding	0.7 Frekuensi Natural IL	Screening
22,147	0,351	2,238	TIDAK KRITIS
11,063	0,336	9,388	TIDAK KRITIS
24,387	0,353	1,949	TIDAK KRITIS
25,171	0,354	1,831	TIDAK KRITIS
19,781	0,349	2,951	TIDAK KRITIS
20,811	0,350	2,669	TIDAK KRITIS
49,897	0,369	0,483	TIDAK KRITIS
42,905	0,365	0,645	TIDAK KRITIS
33,935	0,360	1,007	TIDAK KRITIS

Panjang Span	Vortex Shedding	0.7 Frekuensi Natural IL	Screening
25,842	0,354	1,738	TIDAK KRITIS
34,779	0,361	0,969	TIDAK KRITIS
31,762	0,359	1,158	TIDAK KRITIS
14,728	0,342	5,035	TIDAK KRITIS
18,513	0,347	3,335	TIDAK KRITIS
28,035	0,356	1,480	TIDAK KRITIS

III. Screening Panjang Span Kritis

Panjang Span	Panjang Kritis CF	Screening
22,147	38,084	TIDAK KRITIS
11,063	40,094	TIDAK KRITIS
24,387	39,289	TIDAK KRITIS
25,171	39,540	TIDAK KRITIS
19,781	40,236	TIDAK KRITIS
20,811	39,078	TIDAK KRITIS
49,897	38,590	KRITIS
42,905	38,785	KRITIS
33,935	40,124	TIDAK KRITIS
25,842	39,215	TIDAK KRITIS
34,779	40,094	TIDAK KRITIS
31,762	40,394	TIDAK KRITIS
14,728	38,084	TIDAK KRITIS
18,513	40,124	TIDAK KRITIS
28,035	40,236	TIDAK KRITIS

Panjang Span	Panjang Kritis IL	Screening
22,147	46,115	TIDAK KRITIS
11,063	96,963	TIDAK KRITIS
24,387	44,183	TIDAK KRITIS
25,171	42,822	TIDAK KRITIS
19,781	54,369	TIDAK KRITIS
20,811	51,698	TIDAK KRITIS
49,897	21,986	KRITIS
42,905	25,406	KRITIS

33,935	31,612	KRITIS
25,842	41,724	TIDAK KRITIS
34,779	31,158	KRITIS
31,762	34,055	TIDAK KRITIS
14,728	69,170	TIDAK KRITIS
18,513	57,513	TIDAK KRITIS
28,035	38,502	TIDAK KRITIS

IV. Screening Critical Buckling Load

Panjang Span	Pcr	Pcr Batas	Screening
22,147	4252302,12	12390638,45	TIDAK KRITIS
11,063	4252302,12	49654673,72	TIDAK KRITIS
24,387	4252302,12	10218969,42	TIDAK KRITIS
25,171	4252302,12	9592380,151	TIDAK KRITIS
19,781	4252302,12	15532948,44	TIDAK KRITIS
20,811	4252302,12	14033415,83	TIDAK KRITIS
49,897	4252302,12	2441091,537	KRITIS
42,905	4252302,12	3301679,739	KRITIS
33,935	4252302,12	5277687,427	TIDAK KRITIS
25,842	4252302,12	9101126,182	TIDAK KRITIS
34,779	4252302,12	5024580,079	TIDAK KRITIS
31,762	4252302,12	6024714,576	TIDAK KRITIS
14,728	4252302,12	28019602,9	TIDAK KRITIS
18,513	4252302,12	17733812,04	TIDAK KRITIS
28,035	4252302,12	7732778,686	TIDAK KRITIS

V. Screening Kriteria Gap Pipa dan Diameter

Panjang Span	Gap Pipa	5D	Screening
22,147	0,200	2,995	TIDAK KRITIS
11,063	0,900	2,995	TIDAK KRITIS
24,387	1,700	2,995	TIDAK KRITIS
25,171	1,400	2,995	TIDAK KRITIS
19,781	0,800	2,995	TIDAK KRITIS
20,811	2,000	2,995	TIDAK KRITIS
49,897	2,900	2,995	TIDAK KRITIS
42,905	2,500	2,995	TIDAK KRITIS
33,935	0,400	2,995	TIDAK KRITIS
25,842	1,800	2,995	TIDAK KRITIS
34,779	0,900	2,995	TIDAK KRITIS
31,762	0,700	2,995	TIDAK KRITIS
14,728	0,200	2,995	TIDAK KRITIS
18,513	0,400	2,995	TIDAK KRITIS
28,035	0,800	2,995	TIDAK KRITIS

VI. Screening Kriteria Defleksi dan Diameter

Panjang Span	Defleksi CF	10D	Screening
22,147	0,005	5,990	TIDAK KRITIS
11,063	0,000	5,990	TIDAK KRITIS
24,387	0,008	5,990	TIDAK KRITIS
25,171	0,009	5,990	TIDAK KRITIS
19,781	0,003	5,990	TIDAK KRITIS
20,811	0,004	5,990	TIDAK KRITIS
49,897	0,149	5,990	TIDAK KRITIS
42,905	0,079	5,990	TIDAK KRITIS
33,935	0,030	5,990	TIDAK KRITIS
25,842	0,010	5,990	TIDAK KRITIS
34,779	0,033	5,990	TIDAK KRITIS
31,762	0,023	5,990	TIDAK KRITIS
14,728	0,001	5,990	TIDAK KRITIS
18,513	0,003	5,990	TIDAK KRITIS
28,035	0,014	5,990	TIDAK KRITIS

Panjang Span	Defleksi IL	10D	Screening
22,147	0,002	5,990	TIDAK KRITIS
11,063	0,000	5,990	TIDAK KRITIS
24,387	0,004	5,990	TIDAK KRITIS
25,171	0,005	5,990	TIDAK KRITIS
19,781	0,002	5,990	TIDAK KRITIS
20,811	0,002	5,990	TIDAK KRITIS
49,897	0,089	5,990	TIDAK KRITIS
42,905	0,046	5,990	TIDAK KRITIS
33,935	0,017	5,990	TIDAK KRITIS
25,842	0,005	5,990	TIDAK KRITIS
34,779	0,019	5,990	TIDAK KRITIS
31,762	0,013	5,990	TIDAK KRITIS
14,728	0,000	5,990	TIDAK KRITIS
18,513	0,001	5,990	TIDAK KRITIS
28,035	0,008	5,990	TIDAK KRITIS

VI. Screening Kriteria VIV

Panjang Span	Gap	Frekuensi Natural CF	VIV CF	Frekuensi Natural IL	VIV IL
22,147	0,200	3,197	TIDAK VIV	3,197	TIDAK VIV
11,063	0,900	13,411	TIDAK VIV	13,411	TIDAK VIV
24,387	1,700	2,785	TIDAK VIV	2,784	TIDAK VIV
25,171	1,400	2,616	TIDAK VIV	2,616	TIDAK VIV
19,781	0,800	4,216	TIDAK VIV	4,216	TIDAK VIV
20,811	2,000	3,812	TIDAK VIV	3,812	TIDAK VIV
49,897	2,900	0,692	VIV	0,690	VIV
42,905	2,500	0,922	VIV	0,921	VIV
33,935	0,400	1,439	TIDAK VIV	1,439	VIV
25,842	1,800	2,483	TIDAK VIV	2,483	TIDAK VIV
34,779	0,900	1,385	TIDAK VIV	1,385	VIV
31,762	0,700	1,654	TIDAK VIV	1,654	VIV
14,728	0,200	7,193	TIDAK VIV	7,193	TIDAK VIV
18,513	0,400	4,764	TIDAK VIV	4,764	TIDAK VIV
28,035	0,800	2,115	TIDAK VIV	2,115	TIDAK VIV

LAMPIRAN VII

Simulasi Monte Carlo

I. Perhitungan Variabel Acak Kecepatan Arus

Parameter Statistik	Nilai	Satuan
Uc (1)	0,868	m/s
Uc (2)	0,961	m/s
ΔU_c	0,093	
μ	0,9145	
Mean	0,91425799	
Standar Deviasi	0,027081498	

RAND()	Δ .Rand	Δ .Rand+Uc1	Distribusi Normal
0,196372049	0,018262601	0,886262601	0,891112746
0,010782727	0,001002794	0,869002794	0,852026451
0,293373131	0,027283701	0,895283701	0,899537648
0,85126244	0,079167407	0,947167407	0,942473206
0,481682482	0,044796471	0,912796471	0,9130141
0,91467472	0,085064749	0,953064749	0,951362796
0,069276515	0,006442716	0,874442716	0,874144849
0,024533815	0,002281645	0,870281645	0,860961506
0,530198461	0,049308457	0,917308457	0,916309921
0,419238673	0,038989197	0,906989197	0,908737656
0,068941679	0,006411576	0,874411576	0,874076644
0,403407939	0,037516938	0,905516938	0,907635594
0,874145912	0,08129557	0,94929557	0,94529908
0,496396477	0,046164872	0,914164872	0,914013368
0,505298467	0,046992757	0,914992757	0,914617678
0,192587863	0,017910671	0,885910671	0,890740433
0,597823405	0,055597577	0,923597577	0,920966544

RAND()	Δ .Rand	Δ .Rand+Uc1	Distribusi Normal
0,564073662	0,052458851	0,920458851	0,918626389
0,091974203	0,008553601	0,876553601	0,878274922
0,093603629	0,008705137	0,876705137	0,878540584
0,221067866	0,020559311	0,888559311	0,893443375
0,064506667	0,00599912	0,87399912	0,873148161
0,020208139	0,001879357	0,869879357	0,8587553
0,023984977	0,002230603	0,870230603	0,860700685
0,576280823	0,053594117	0,921594117	0,919468143
0,751668849	0,069905203	0,937905203	0,932666658
0,161101877	0,014982475	0,882982475	0,887448949
0,317014151	0,029482316	0,897482316	0,901365445
0,794407602	0,073879907	0,941879907	0,936513848
0,960877114	0,089361572	0,957361572	0,961947329
0,959045708	0,089191251	0,957191251	0,961372154
0,345415028	0,032123598	0,900123598	0,903486896
0,794577446	0,073895703	0,941895703	0,936530013
0,369309841	0,034345815	0,902345815	0,905221387
0,303031816	0,028181959	0,896181959	0,900292049
0,1608355	0,014957701	0,882957701	0,887419417
0,740100608	0,068829357	0,936829357	0,931689148
0,312414047	0,029054506	0,897054506	0,901014617
0,234228377	0,021783239	0,889783239	0,894624112
0,670084595	0,062317867	0,930317867	0,926177824
0,69412382	0,064553515	0,932553515	0,928003845
0,324555031	0,030183618	0,898183618	0,901935939
0,131374219	0,012217802	0,880217802	0,883928916
0,728156518	0,067718556	0,935718556	0,93070315
0,596668014	0,055490125	0,923490125	0,920885698
0,385609774	0,035861709	0,903861709	0,906383231
0,976936863	0,090855128	0,958855128	0,968264887

RAND()	Δ .Rand	Δ .Rand+Uc1	Distribusi Normal
0,91743207	0,085321183	0,953321183	0,951847215
0,794921403	0,07392769	0,94192769	0,936562773
0,379968224	0,035337045	0,903337045	0,905982852
0,246785767	0,022951076	0,890951076	0,895716931
0,383990345	0,035711102	0,903711102	0,90626848
0,703479614	0,065423604	0,933423604	0,928731284
0,583780591	0,054291595	0,922291595	0,919987751
0,952882271	0,088618051	0,956618051	0,959577975
0,126041685	0,011721877	0,879721877	0,88324145
0,501966725	0,046682905	0,914682905	0,914391498
0,079364219	0,007380872	0,875380872	0,876090382
0,074798418	0,006956253	0,874956253	0,875234716
0,146785946	0,013651093	0,881651093	0,885813803
0,514509898	0,047849421	0,915849421	0,915243186
0,697406889	0,064858841	0,932858841	0,928257958
0,965718527	0,089811823	0,957811823	0,963581223
0,345144795	0,032098466	0,900098466	0,903467039
0,786738221	0,073166655	0,941166655	0,935791969
0,863080146	0,080266454	0,948266454	0,943892268
0,324768812	0,0302035	0,8982035	0,901952032
0,293265592	0,0272737	0,8952737	0,899529185
0,465035678	0,043248318	0,911248318	0,911881451
0,566618965	0,052695564	0,920695564	0,918801527
0,397310817	0,036949906	0,904949906	0,907208299
0,836906886	0,07783234	0,94583234	0,940847273
0,24312022	0,02261018	0,89061018	0,89540112
0,138256429	0,012857848	0,880857848	0,884788274

II. Perhitungan Variabel Acak Beban Hidrodinamis (Gaya Drag)

Parameter Statistik	Nilai
Fd	572,256
Fd	766,265
ΔFd	194,009
Mean	669,583
Standar Deviasi	56,162

RAND()	Δ .Rand	Δ .Rand+ q_1	Distribusi Normal
0,777641346	150,8694199	723,1254199	711,7095617
0,82269858	159,6109289	731,8669289	720,7596631
0,292004539	56,65150868	628,9075087	638,1754557
0,967328909	187,6705144	759,9265144	772,1751693
0,089682167	17,39914749	589,6551475	593,6007771
0,886901701	172,0669122	744,3229122	736,708599
0,360016494	69,84643999	642,10244	648,777019
0,542335847	105,2180353	677,4740353	674,8283474
0,577464912	112,0333902	684,2893902	679,8225236
0,988597413	191,7967955	764,0527955	796,4908871
0,209978809	40,73777883	612,9937788	623,6592994
0,729004948	141,433521	713,689521	703,0519273
0,227568591	44,15035484	616,4063548	627,0011942
0,820064481	159,0998899	731,3558899	720,1942029
0,293871634	57,01374182	629,2697418	638,4797807
0,512914872	99,51010132	671,7661013	670,6834445
0,756123067	146,6946801	718,9506801	707,7651093
0,091584099	17,76813946	590,0241395	594,253921
0,850435723	164,9921841	737,2481841	727,0719284
0,655702841	127,2122524	699,4682524	691,3337503
0,38751406	75,18121525	647,4372153	652,8472989

RAND()	Δ .Rand	Δ .Rand+ q_1	Distribusi Normal
0,196713668	38,16422193	610,4202219	621,0289351
0,66461907	128,9420812	701,1980812	692,6981173
0,470979996	91,37435801	663,630358	664,7871564
0,738595815	143,2942354	715,5502354	704,6896714
0,88549695	171,7943777	744,0503777	736,2998673
0,470669619	91,31414206	663,5701421	664,7434276
0,805776653	156,3279226	728,5839226	717,2135125
0,597743456	115,9676101	688,2236101	682,7429617
0,317756077	61,64753873	633,9035387	642,2986955
0,146756578	28,47209686	600,7280969	609,9842976
0,7224782	140,167273	712,423273	701,9539529
0,410336551	79,60898385	651,8649838	656,1616194
0,177794385	34,4937109	606,7497109	617,0834189
0,822595218	159,5908757	731,8468757	720,7373749
0,044251912	8,585269266	580,8412693	573,3852667
0,320545496	62,18871109	634,4447111	642,7364322
0,737837414	143,1470989	715,4030989	704,5590656
0,044892144	8,709479887	580,9654799	573,7668251
0,72304388	140,2770201	712,5330201	702,0486088
0,39099253	75,85606983	648,1120698	653,3557898
0,89567979	173,7699403	746,0259403	739,348752
0,072571624	14,0795482	586,3355482	587,1998264
0,878480006	170,4330275	742,6890275	734,3098096
0,850709913	165,0453795	737,3013795	727,1380181
0,214355196	41,58683728	613,8428373	624,5054361
0,280830065	54,48356003	626,73956	636,3346062
0,137712671	26,71749757	598,9734976	607,7304024
0,324161374	62,89022395	635,1462239	643,3015056
0,790355765	153,3361316	725,5921316	714,1426677
0,884890919	171,6768024	743,9328024	736,1246366

RAND()	$\Delta.Rand$	$\Delta.Rand+q1$	Distribusi Normal
0,288735365	56,01725938	628,2732594	637,6404063
0,888996237	172,4732709	744,7292709	737,3248174
0,746624391	144,8518515	717,1078515	706,0844904
0,589261048	114,3219466	686,5779466	681,5172302
0,27058918	52,49673614	624,7527361	634,6162202
0,647996715	125,7171946	697,9731946	690,1652117
0,22876161	44,38181128	616,6378113	627,222429
0,41237595	80,00464573	652,2606457	656,4554646
0,792765991	153,8037372	726,0597372	714,6135332
0,638322474	123,8403048	696,0963048	688,7111561
0,123454025	23,95119195	596,207192	603,9612557
0,737435818	143,0691857	715,3251857	704,4899844
0,089055255	17,27752096	589,533521	593,3832346
0,631385787	122,4945251	694,7505251	687,6767743
0,146011006	28,32744919	600,5834492	609,8020951
0,541237329	105,0049129	677,2609129	674,6731398
0,118023207	22,89756445	595,1535645	602,4457964
0,411481801	79,83117266	652,0871727	656,3266742
0,041220513	7,997150528	580,2531505	571,5157
0,112281924	21,78370378	594,0397038	600,789056
0,91669823	177,8477069	750,1037069	746,4055316
0,772171765	149,8082719	722,0642719	710,6874585
0,177794385	34,4937109	606,7497109	617,0834189

III. Perhitungan Uextreme dari Variabel Acak

Uc	Distribusi Normal Uc	Uw	Uextreme
0,886262601	0,891112746	0,067119838	0,958232584
0,869002794	0,852026451	0,067119838	0,919146289
0,895283701	0,899537648	0,067119838	0,966657486
0,947167407	0,942473206	0,067119838	1,009593044
0,912796471	0,9130141	0,067119838	0,980133938
0,953064749	0,951362796	0,067119838	1,018482634
0,874442716	0,874144849	0,067119838	0,941264687
0,870281645	0,860961506	0,067119838	0,928081344
0,917308457	0,916309921	0,067119838	0,983429759
0,906989197	0,908737656	0,067119838	0,975857494
0,874411576	0,874076644	0,067119838	0,941196482
0,905516938	0,907635594	0,067119838	0,974755432
0,94929557	0,94529908	0,067119838	1,012418918
0,914164872	0,914013368	0,067119838	0,981133206
0,914992757	0,914617678	0,067119838	0,981737516
0,885910671	0,890740433	0,067119838	0,957860271
0,923597577	0,920966544	0,067119838	0,988086382
0,920458851	0,918626389	0,067119838	0,985746227
0,876553601	0,878274922	0,067119838	0,94539476
0,876705137	0,878540584	0,067119838	0,945660422
0,888559311	0,893443375	0,067119838	0,960563213
0,87399912	0,873148161	0,067119838	0,940267999
0,869879357	0,8587553	0,067119838	0,925875138

IV. Perhitungan Frekuensi Natural dari Variabel Acak

Defleksi	Fn 22	Defleksi	11	Defleksi	24	Defleksi	25	Defleksi	19
0,002490068	3,197112966	0,000152876	13,41079919	0,003675685	2,78447348	0,004177873	2,615626043	0,001578439	4,216410044
0,003033594	3,197115593	0,000186246	13,41079923	0,004478004	2,784478445	0,005089809	2,615632059	0,001922976	4,216411441
0,00267054	3,197113781	0,000163956	13,4107992	0,003942086	2,78447502	0,004480671	2,615627909	0,001692838	4,216410477
0,003104656	3,197115974	0,000190609	13,41079923	0,004582902	2,784479166	0,005209038	2,615632933	0,001968022	4,216411644
0,002436352	3,197112735	0,000149579	13,41079918	0,003596393	2,784473043	0,004087747	2,615625513	0,001544388	4,216409921
0,00257575	3,197113346	0,000158137	13,41079919	0,003802163	2,784474198	0,004321631	2,615626913	0,001632752	4,216410246
0,002997132	3,1971154	0,000184007	13,41079922	0,004424182	2,784478081	0,005028633	2,615631619	0,001899864	4,216411338
0,002756416	3,197114189	0,000169229	13,41079921	0,004068852	2,784475791	0,004624756	2,615628843	0,001747275	4,216410694
0,002530079	3,197113142	0,000155333	13,41079919	0,003734747	2,784473812	0,004245004	2,615626446	0,001603802	4,216410137
0,002982429	3,197115324	0,000183105	13,41079922	0,004402478	2,784477936	0,005003964	2,615631443	0,001890543	4,216411297
0,003085415	3,19711587	0,000189427	13,41079923	0,004554499	2,784478969	0,005176755	2,615632695	0,001955825	4,216411588
0,002845093	3,197114623	0,000174673	13,41079921	0,004199751	2,784476612	0,00477354	2,615629839	0,001803487	4,216410925

Defleksi	Fn 22	Defleksi	11	Defleksi	24	Defleksi	25	Defleksi	19
0,002760915	3,197114211	0,000169505	13,41079921	0,004075493	2,784475832	0,004632304	2,615628893	0,001750127	4,216410705
0,002716064	3,197113996	0,000166751	13,4107992	0,004009286	2,784475426	0,004557052	2,615628401	0,001721696	4,216410591
0,00275864	3,1971142	0,000169365	13,41079921	0,004072135	2,784475811	0,004628488	2,615628868	0,001748685	4,2164107
0,002707496	3,197113955	0,000166225	13,4107992	0,003996639	2,784475349	0,004542677	2,615628308	0,001716265	4,216410569
0,002408439	3,197112617	0,000147865	13,41079918	0,00355519	2,784472819	0,004040915	2,615625242	0,001526695	4,216409858
0,003005011	3,197115442	0,000184491	13,41079923	0,004435812	2,784478159	0,005041851	2,615631713	0,001904858	4,21641136
0,002637021	3,197113626	0,000161899	13,4107992	0,003892608	2,784474726	0,004424433	2,615627553	0,001671591	4,216410394
0,002547723	3,197113221	0,000156416	13,41079919	0,003760792	2,784473961	0,004274607	2,615626625	0,001614986	4,216410179
0,002457587	3,197112826	0,000150882	13,41079918	0,003627738	2,784473214	0,004123375	2,615625721	0,001557849	4,216409969
0,002846486	3,19711463	0,000174759	13,41079921	0,004201807	2,784476626	0,004775876	2,615629855	0,00180437	4,216410929
0,003246684	3,197116763	0,000199329	13,41079925	0,004792555	2,784480658	0,005447334	2,615634741	0,002058053	4,216412063
0,002457721	3,197112826	0,000150891	13,41079918	0,003627936	2,784473216	0,0041236	2,615625722	0,001557934	4,216409969
0,002632949	3,197113607	0,000161649	13,4107992	0,003886597	2,784474691	0,004417601	2,61562751	0,00166901	4,216410384
0,003194811	3,197116471	0,000196144	13,41079924	0,004715984	2,784480105	0,005360302	2,615634072	0,002025171	4,216411908

Defleksi	20	Defleksi	49	Defleksi	42	Defleksi	33	Defleksi	25
0,00193690	3,81234045	0,069529668	0,68898398	0,037001211	0,920533104	0,014084984	1,439067539	0,004647245	2,4832487
0,0023596	3,81234237	0,084706424	0,68939355	0,045077739	0,920691949	0,017159418	1,439104448	0,005661634	2,4833945
0,00207727	3,81234147	0,074568934	0,68911162	0,039682929	0,920582383	0,015105815	1,439078989	0,004984061	2,4824906
0,00241496	3,81234633	0,086690681	0,6894503	0,04613369	0,920715025	0,01756138	1,439109811	0,005794259	2,4832591
0,00189513	3,81230291	0,068029758	0,68894873	0,036203012	0,920519102	0,01378114	1,439064285	0,004546994	2,4832424
0,00200354	3,81240732	0,071922132	0,68903211	0,038274395	0,920556071	0,014569638	1,439072875	0,004807154	2,483247
0,00233138	3,81342218	0,08368832	0,68963556	0,044535941	0,920680316	0,016953176	1,439101745	0,005593586	2,4832548
0,00214406	3,82341342	0,076966854	0,68174644	0,040959017	0,920607041	0,015591574	1,439084718	0,005144334	2,4832512
0,00196809	3,12340585	0,07064689	0,69011393	0,037595757	0,920543732	0,014311306	1,439070008	0,004721919	2,4832439
0,00231981	381234212	0,083277767	0,89351566	0,044317459	0,920675664	0,016870008	1,439100664	0,005566145	2,4832521
0,00239999	3,81234257	0,08615341	068943678	0,045847774	0,920708724	0,017452542	1,439108346	0,005758348	2,4832561
0,00221304	3,81234656	0,079442962	0,68924204	0,042276713	0,920633322	0,016093172	1,439090825	0,005309833	2,483234
0,00214756	3,81231357	0,077092472	0,6891703	0,041025866	0,920608355	0,015617021	1,439085023	0,00515273	2,4832023
0,00211268	3,81241202	0,075840094	0,68914517	0,040359395	0,920595357	0,01536332	1,439082003	0,005069024	2,4834963
0,00214586	3,81341349	0,077028957	0,68916317	0,040992065	0,92060769	0,015604154	1,439084869	0,005148485	2,4832521
0,00210603	3,82341173	0,075600857	0,68938178	0,040232081	0,920592899	0,015314857	1,439081432	0,005053033	2,4832454

Defleksi	34	Defleksi	31	Defleksi	14	Defleksi	18	Defleksi	28
0,015514196	1,384715936	0,010705363	1,654227338	0,000479942	7,192850402	0,001203938	4,76359929	0,006441717	2,114512324
0,019032844	1,384760784	0,013133359	1,654253037	0,000588794	7,192850633	0,001476993	4,763600249	0,00790271	2,114524316
0,016244442	1,384724492	0,01120926	1,654232241	0,000502533	7,192850446	0,001260607	4,763599473	0,006744926	2,114514612
0,015264339	1,384713099	0,010532953	1,654225712	0,000472213	7,192850387	0,001184548	4,763599229	0,006337973	2,114511565
0,019673484	1,384769932	0,013575424	1,65425828	0,000608612	7,19285068	0,001526708	4,763600445	0,008168713	2,114526763
0,017085973	1,384734841	0,011789947	1,654238171	0,000528566	7,192850499	0,001325912	4,763599695	0,007094341	2,114517379
0,017623258	1,384741721	0,012160693	1,654242113	0,000545187	7,192850535	0,001367606	4,763599842	0,00731743	2,114519219
0,017598719	1,384741402	0,01214376	1,654241931	0,000544428	7,192850533	0,001365702	4,763599835	0,007307241	2,114519133
0,017070105	1,384734641	0,011778997	1,654238056	0,000528075	7,192850498	0,00132468	4,76359969	0,007087753	2,114517325
0,019475193	1,384767068	0,013438596	1,654256638	0,000602478	7,192850666	0,001511321	4,763600384	0,00808638	2,114525997
0,016175751	1,384723671	0,01116186	1,65423177	0,000500408	7,192850442	0,001255276	4,763599456	0,006716404	2,114514392
0,017855349	1,384744759	0,012320844	1,654243854	0,000552367	7,192850551	0,001385617	4,763599907	0,007413797	2,114520031
0,018123011	1,384748312	0,012505541	1,65424589	0,000560648	7,192850569	0,001406388	4,763599983	0,007524934	2,114520981
0,019983375	1,384774466	0,01378926	1,654260878	0,000618199	7,192850704	0,001550757	4,763600542	0,008297384	2,114527975
0,016851318	1,384731903	0,011628026	1,654236487	0,000521307	7,192850484	0,001307702	4,763599632	0,006996909	2,114516593
0,017782438	1,3847438	0,012270533	1,654243305	0,000550112	7,192850546	0,001379959	4,763599886	0,007383524	2,114519775

Defleksi	34	Defleksi	31	Defleksi	14	Defleksi	18	Defleksi	28
0,014570501	1,384705461	0,010054179	1,654221335	0,000450748	7,192850348	0,001130705	4,763599066	0,006049881	2,114509523
0,016070039	1,384722413	0,011088915	1,654231049	0,000497137	7,192850435	0,001247073	4,763599429	0,006672511	2,114514056
0,020088971	1,384776027	0,013862125	1,654261772	0,000621466	7,192850712	0,001558951	4,763600576	0,008341229	2,114528392
0,017235797	1,384736738	0,011893331	1,654239258	0,000533201	7,192850509	0,001337538	4,763599735	0,00715655	2,114517886
0,018895158	1,384758857	0,01303835	1,654251933	0,000584534	7,192850623	0,001466308	4,763600208	0,007845541	2,114523801
0,015737134	1,384718506	0,010859198	1,654228811	0,000486839	7,192850415	0,001221238	4,763599345	0,006534284	2,114513011
0,017098348	1,384734997	0,011798486	1,65423826	0,000528949	7,1928505	0,001326872	4,763599698	0,007099479	2,114517421
0,017141076	1,384735536	0,01182797	1,654238569	0,000530271	7,192850503	0,001330188	4,763599709	0,007117221	2,114517565
0,016148675	1,384723348	0,011143177	1,654231585	0,00049957	7,19285044	0,001253175	4,763599449	0,006705162	2,114514306
0,016951459	1,384733151	0,011697127	1,654237203	0,000524405	7,192850491	0,001315473	4,763599658	0,007038489	2,114516927
0,015500505	1,384715779	0,010695915	1,654227248	0,000479519	7,192850401	0,001202875	4,763599287	0,006436032	2,114512282
0,015392712	1,384714551	0,010621535	1,654226544	0,000476184	7,192850395	0,00119451	4,76359926	0,006391275	2,114511953
0,018495632	1,384753346	0,012762663	1,654248775	0,000572175	7,192850595	0,001435304	4,76360009	0,007679652	2,114522327
0,019298981	1,384764547	0,013317003	1,654255194	0,000597027	7,192850653	0,001497646	4,76360033	0,008013214	2,114525323
0,016739843	1,384730521	0,011551105	1,654235695	0,000517858	7,192850477	0,001299051	4,763599602	0,006950623	2,114516224
0,01899874	1,384760305	0,013109826	1,654252763	0,000587739	7,192850631	0,001474347	4,763600239	0,007888549	2,114524188

Defleksi	34	Defleksi	31	Defleksi	14	Defleksi	18	Defleksi	28
0,014243749	1,384701988	0,009828708	1,654219345	0,00044064	7,19285033	0,001105348	4,763598992	0,005914209	2,114508594
0,019359099	1,384765405	0,013358487	1,654255685	0,000598887	7,192850657	0,001502311	4,763600348	0,008038176	2,114525552

Fn 49.9	Screening	VIV	Fn 42.9	VIV	Fn 33.9	VIV	Fn 34.8	VIV	Fn 22.1	VIV
0,664524055	1,935661815	1	0,897394367	1	1,420068619	1	1,365009523	1	3,193434324	0
0,645716458	1,856706193	1	0,871915375	1	1,379707981	1	1,326215416	1	3,102657702	0
0,663295221	1,952680398	1	0,895729714	1	1,417431721	1	1,36247497	1	3,187503589	0
0,661083996	2,039411657	1	0,89273423	1	1,412686704	1	1,357914121	1	3,176831412	0
0,662191714	1,979903281	1	0,894234828	1	1,415063738	1	1,360198895	1	3,18217768	0
0,660894929	2,057368926	1	0,892478105	1	1,412280986	1	1,35752415	1	3,175918898	0
0,672678842	1,901386095	1	0,90844109	1	1,43756709	1	1,381828835	1	3,232790664	0
0,588575447	1,874755302	1	0,794489331	1	1,257050956	1	1,208319451	1	2,826782382	0
0,662006873	1,986560949	1	0,893984429	1	1,414667092	1	1,359817644	1	3,181285569	0
0,662471328	1,971264721	1	0,894613613	1	1,415663755	1	1,360775624	1	3,183527197	0
0,672762409	1,901248319	1	0,908554291	1	1,437746404	1	1,382001189	1	3,233193964	0
0,662552084	1,969038519	1	0,894723011	1	1,415837047	1	1,360942191	1	3,183916956	0
0,661019462	2,045120018	1	0,892646807	1	1,41254822	1	1,357781012	1	3,176519944	0
0,662133144	1,981921835	1	0,894155486	1	1,414938055	1	1,360078091	1	3,181895003	0
0,662098826	1,983142561	1	0,894108996	1	1,414864413	1	1,360007307	1	3,181729372	0
0,664595631	1,93490973	1	0,897491327	1	1,42022221	1	1,365157153	1	3,193779769	0

Fn 49.9	Screening	VIV	Fn 42.9	VIV	Fn 33.9	VIV	Fn 34.8	VIV	Fn 22.1	VIV
0,661781591	1,995967483	1	0,893679245	1	1,414183663	1	1,359352979	1	3,180198274	0
0,661890083	1,991240291	1	0,893826217	1	1,414416476	1	1,359576755	1	3,1807219	0
0,669016812	1,90972898	1	0,903480444	1	1,429709246	1	1,374275972	1	3,215117358	0
0,668848235	1,910265626	1	0,903252084	1	1,429347515	1	1,373928281	1	3,214303779	0
0,664115887	1,940369763	1	0,896841438	1	1,419192752	1	1,36416765	1	3,191464381	0
0,67401266	1,899372754	1	0,910247882	1	1,440429104	1	1,384579767	1	3,239227699	0
0,624699676	1,870298692	1	0,843440639	1	1,334600342	1	1,282858615	1	3,001203911	0
0,596363331	1,874228435	1	0,805043498	1	1,273771513	1	1,22439095	1	2,864389876	0
0,661850021	1,992940663	1	0,893771947	1	1,414330508	1	1,359494124	1	3,180528547	0
0,661348602	2,019602105	1	0,893092686	1	1,413254518	1	1,358459897	1	3,178108503	0

Fn 11.1	VIV	Fn 24.4	VIV	Fn 25.2	VIV	Fn 19.8	VIV	Fn 20.8	VIV
13,48816748	0	2,775889131	0	2,605685904	0	4,219365044	0	3,812034275	0
13,10475127	0	2,696982195	0	2,531617365	0	4,099425098	0	3,703673242	0

Fn 49.9	Screening	VIV	Fn 42.9	VIV	Fn 33.9	VIV	Fn 34.8	VIV	Fn 22.1	VIV
13,46311764	0	2,770733881	0	2,600846762	0	4,211528973	0	3,804954692	0	
13,41804122	0	2,761457166	0	2,592138874	0	4,197428203	0	3,7922152	0	
13,44062242	0	2,766104372	0	2,596501124	0	4,204492038	0	3,798597097	0	
13,414187	0	2,76066397	0	2,591394315	0	4,196222531	0	3,791125922	0	
13,65439814	0	2,810099356	0	2,637798436	0	4,271365185	0	3,859014362	0	
11,93952731	0	2,457179635	0	2,306519008	0	3,734920737	0	3,374357883	0	
13,43685439	0	2,765328911	0	2,595773212	0	4,203313323	0	3,797532175	0	
13,44632243	0	2,76727743	0	2,597602253	0	4,206275108	0	3,800208031	0	
13,65610157	0	2,810449921	0	2,638127506	0	4,271898051	0	3,859495785	0	
13,44796866	0	2,767616225	0	2,597920274	0	4,206790082	0	3,80067329	0	
13,41672566	0	2,761186425	0	2,591884734	0	4,197016671	0	3,791843397	0	
13,43942847	0	2,765858657	0	2,596270476	0	4,204118547	0	3,798259663	0	
13,43872889	0	2,765714684	0	2,596135331	0	4,203899705	0	3,798061948	0	
13,48962655	0	2,776189407	0	2,605967767	0	4,219821468	0	3,812446636	0	
13,43226194	0	2,764383787	0	2,594886042	0	4,201876719	0	3,796234259	0	
13,4344736	0	2,764838946	0	2,595313291	0	4,202568568	0	3,796859318	0	

Fn 49.9	Screening	VIV	Fn 42.9	VIV	Fn 33.9	VIV	Fn 34.8	VIV	Fn 22.1	VIV
13,57975082	0	2,794736957	0	2,623378024	0	4,248014071	0	3,837917546	0	
13,57631448	0	2,794029759	0	2,62271419	0	4,246939117	0	3,836946368	0	
13,47984697	0	2,774176772	0	2,604078543	0	4,216762228	0	3,809682733	0	
13,68158646	0	2,815694703	0	2,64305069	0	4,279870212	0	3,866698319	0	
12,6762375	0	2,608794226	0	2,448836893	0	3,965377779	0	3,582566756	0	
12,09837138	0	2,489869657	0	2,337204541	0	3,7846102	0	3,419250357	0	
13,43365693	0	2,764670875	0	2,595155525	0	4,202313097	0	3,79662851	0	
13,42343531	0	2,762567268	0	2,593180908	0	4,199115578	0	3,793739677	0	
13,50446493	0	2,779243142	0	2,608834254	0	4,2244632	0	3,816640259	0	

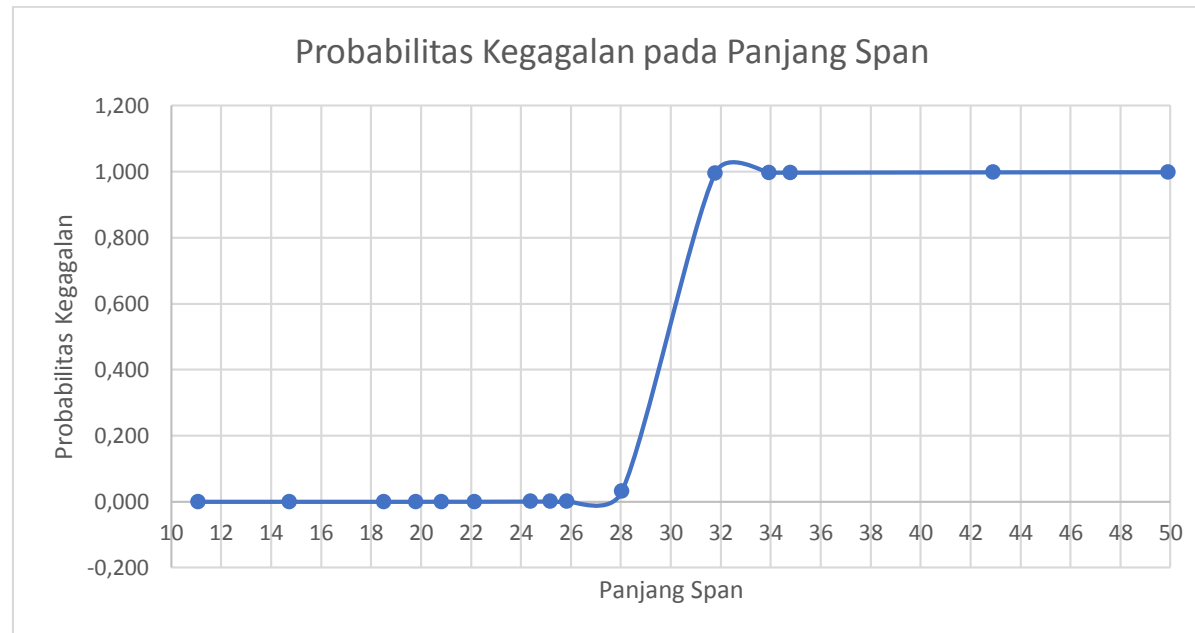
Fn 25.8	VIV OCCURS	Fn 31.8	VIV OCCURS	Fn 14.7	VIV OCCURS	Fn 18.5	VIV OCCURS	Fn 28.0	VIV OCCURS
2,472245077	0	1,636625707	1	7,221469223	0	4,77127073	0	2,100561729	0
2,401969923	0	1,590107158	1	7,016190922	0	4,635642169	0	2,040852884	0
2,467653769	0	1,633586494	1	7,208057717	0	4,762409671	0	2,096660752	0
2,459391851	0	1,628117523	1	7,183924122	0	4,746464464	0	2,089641064	0

Fn 25.8	VIV OCCURS	Fn 31.8	VIV OCCURS	Fn 14.7	VIV OCCURS	Fn 18.5	VIV OCCURS	Fn 28.0	VIV OCCURS
2,46353069	0	1,630857225	1	7,196013939	0	4,754452277	0	2,093157604	0
2,458685424	0	1,627649904	1	7,181860603	0	4,745101086	0	2,089040853	0
2,502712983	0	1,656793931	1	7,310467931	0	4,830072693	0	2,126448603	0
2,188399916	0	1,448735482	1	6,392338345	0	4,223459188	0	1,85939466	1
2,462840059	0	1,630400061	1	7,193996558	0	4,753119382	0	2,092570812	0
2,464575426	0	1,631548787	1	7,199065679	0	4,756468579	0	2,094045257	0
2,5030252	0	1,657000602	1	7,311379936	0	4,83067526	0	2,126713876	0
2,46487716	0	1,631748519	1	7,199947062	0	4,757050914	0	2,094301623	0
2,459150727	0	1,627957911	1	7,183219782	0	4,745999103	0	2,089436194	0
2,463311855	0	1,630712366	1	7,195374706	0	4,754029932	0	2,092971671	0
2,463183631	0	1,630627489	1	7,195000156	0	4,753782465	0	2,092862727	0
2,472512505	0	1,636802731	1	7,222250397	0	4,771786857	0	2,100788947	0
2,461998324	0	1,629842876	1	7,191537797	0	4,751494864	0	2,091855638	0
2,462403692	0	1,630111209	1	7,192721903	0	4,752277209	0	2,092200056	0
2,489031105	0	1,647737212	1	7,27050229	0	4,803667161	0	2,114823876	0

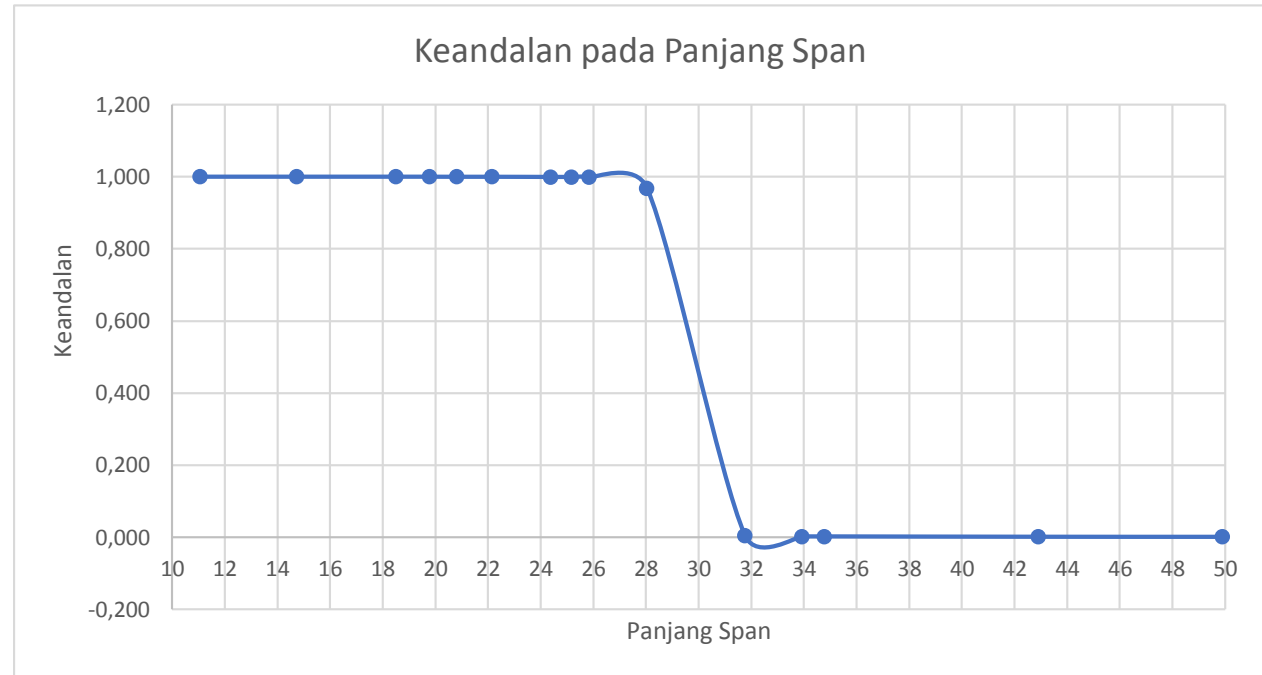
Fn 25.8	VIV OCCURS	Fn 31.8	VIV OCCURS	Fn 14.7	VIV OCCURS	Fn 18.5	VIV OCCURS	Fn 28.0	VIV OCCURS
2,488401268	0	1,647320292	1	7,268662497	0	4,8024516	0	2,11428874	0
2,470720036	0	1,635616207	1	7,21701448	0	4,768327456	0	2,099265987	0
2,507696246	0	1,660092602	1	7,32502436	0	4,83969021	0	2,130682603	0
2,323429021	0	1,538117239	1	6,786767711	0	4,484060931	0	1,974121135	0
2,217513893	0	1,468007273	1	6,477382326	0	4,279648232	0	1,884131122	0
2,462254006	0	1,630012124	1	7,192284662	0	4,751988322	0	2,092072877	0
2,460380517	0	1,62877197	1	7,18681208	0	4,748372555	0	2,090481078	0

Panjang Span	10000x	Persentase
11,063	0,000	0%
14,728	0,000	0%
18,513	0,000	0%
19,781	0,000	0%
20,811	0,000	0%
22,147	0,000	0%
24,387	0,001	0%
25,171	0,001	0%
25,842	0,001	0%
28,035	0,032	3%
31,762	0,996	100%
33,935	0,998	100%
34,779	0,998	100%
42,905	0,999	100%
49,897	0,999	100%

VI. Hubungan Antara Kegagalan dan



Panjang Span	10000x	Persentase
11,063	1,000	100%
14,728	1,000	100%
18,513	1,000	100%
19,781	1,000	100%
20,811	1,000	100%
22,147	1,000	100%
24,387	0,999	100%
25,171	0,999	100%
25,842	0,999	100%
28,035	0,968	97%
31,762	0,004	0%
33,935	0,002	0%
34,779	0,002	0%
42,905	0,001	0%
49,897	0,001	0%



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta, 01 Juni 1998, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Islam Al-Azhar 9 Bekasi, SMP Islam Al-Azhar 9 Bekasi, dan SMAN 81 Jakarta. Setelah lulus pada tahun 2015, Penulis mengikuti program SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Kelautan FTK ITS Surabaya dan terdaftar dengan NRP. 04311540000040.

Di Departemen Teknik Kelautan, Penulis mengambil bidang keahlian studi Pipa terkait dengan analisis dan keandala *Offshore Pipeline*. Penulis aktif dalam kegiatan ORMAWA dan juga beberapa seminar dan pelatihan yang diselenggarakan oleh jurusan, fakultas, dan institute. Dan penulis mengambil Tugas Akhir dengan topik, “Analisis Keandalan pada *Offshore Pipeline* Akibat *Vortex Induced Vibration* (VIV) di Perairan Madura” sebagai syarat kelulusan Strata 1.